

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Identifikace možných poruch strojů s následnou verifikací

**Identification of Possible Failures of Machines with Subsequent
Verification**

Student :

Bc. Viktor Žárský

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Blata, Ph.D.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Viktor Žárský

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství

Specializace:

72 Technická diagnostika, opravy a udržování

Téma:

Identifikace možných poruch strojů s následnou verifikací
Identification of Possible Failures of Machines with Subsequent
Verification

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Zabývejte se možností vytvoření demonstračního modelu s možnostmi demonstrace nevývahy, nesouostosti, volné patky elektromotoru, špatného mazání ložiska, poškození ložiska, ustavení řemene, napnutí řemene, měření otáček, měření teplot na ložiskách. Proved'te konstrukční návrh tohoto zařízení, proved'te potřebná měření na modelu a srovnajte s reálnými daty z praxe.

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proved'te potřebná měření.
5. Proved'te konkrétní provozní vyhodnocení.

Podrobnější specifikaci zadání nebo jeho úpravy provede vedoucí práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

JENČÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. ČVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6

HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.

KREIDL, M., ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika*. BEN – technická literatura, Praha 2006, 1.vydání, 408s., ISBN 80-7300-157-6

KREIDL, M. a kol.: *Diagnostické systémy*. ČVUT v Praze, Praha 2001, 352 s., ISBN 80-01-02349-4

Podkladové materiály - ADASH s.r.o., Brüel Kjaer, SKF Ložiska a.s.

ČSN 20 0065 *Metody měření a hodnocení mechanického kmitání-Mezní hodnoty kmitání*. Praha: Český normalizační institut, červen 1992. 16 s.

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 32 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 16.5.2016

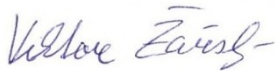


.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ведоми, же Высшая школа ба́ньская – Техни́ческая универси́та Остра́ва (да́ле же́н „ВШБ-ТУО“) ма́а пра́во нево́дделе́чно к сво́ей вну́трянне́й потре́бе дипло́мовую ра́боту у́жить (§ 35 одст. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было́ сже́днано́, же́ с ВШБ-ТУО, в слу́чае́ за́явлю́ с ее́ сто́роны, за́клучу́ лицен́зионный со́глаше́ние с о́правнове́нием у́жить де́ло в ро́зсаве́ § 12 одст. 4 ау́торского́ за́кона.
- было́ сже́днано́, же́ у́жить сво́е де́ло – дипло́мовую ра́боту же́ли́ посче́дать лицен́зии к ее́му́ во́змуще́нию мо́гу же́ли́ с со́гласие́м ВШБ-ТУО, ко́торая́ же́ли́ о́правнове́на в та́ковом слу́чае́ о́де́ мене́ потре́бовать со́отве́тствующий в́клад на о́плату́ ра́схо́дов, ко́торые́ бы́ли ВШБ-ТУО на со́здание́ де́ла во́неле́жены (а́же́ до ее́ ре́альной во́ыше́).
- беру на vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 16.5.2016


Viktor Žárský

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Viktor Žárský

Adresa trvalého pobytu autora práce: Ostrava, Výškovická 162

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Žárský, V. Identifikace možných poruch strojů s následnou verifikací. Ostrava: VŠB – Technická universita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2016, 52 s. Vedoucí práce: Blata, J.

Tématem diplomové práce je navrhnout a sestavit demonstrační model jako učební pomůcku, na kterém půjdou simulovat různé poruchy strojů. Dané poruchy strojů lze následně verifikovat metodami vibrační diagnostiky. První část diplomové práce je věnována návrhu a tvorbě demonstračního modelu. v druhé části diplomové práce jsou popsány jednotlivé simulace poruch, které lze na demonstračním modelu provádět. Poslední část diplomové práce se zabývá reálnými příklady poruch strojů, se kterými jsme se ve své dosavadní vibrodiagnostické praxi setkal.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

Žárský, V. Identification of Possible Failures of Machines with Subsequent Verification. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of production Machines and Desing, 2016, 52 p. Thesis head: Blata, J.

The topic of master thesis is designing and constructing a demonstration model as a teaching aid, on which various machine malfunctions can be simulated. Subsequently, it is possible to verify particular malfunctions by the vibrational diagnostic methods. The first part of master thesis is focused on the design and the construction of a demonstrational model. In the second part of the thesis, particular malfunction simulations, which are possible to be performed on the model, are described. The last part deals with real examples of machine breakdowns which I have encountered in my vibro-diagnostic practice so far.

Obsah

	strana
Seznam použitých zkratek a symbolů.....	9
Úvod.....	10
1 Koncept návrhu.....	11
1.1 Popis existujícího modelu.....	11
1.2 Vylepšení stávajícího modelu.....	12
2 Konstrukční návrh modelu.....	13
2.1 Náčrt.....	14
2.2 Vytvoření 3D modelu.....	14
3 Stavba modelu.....	16
3.1 Podstava.....	16
3.2 Převodovka.....	17
3.3 Řemenový převod.....	19
3.4 Posuvná deska pod převodovku.....	19
3.5 Nastavitelné rameno otáčkové sondy.....	20
3.6 Zkompletování modelu.....	20
3.6.1 Souhrnné informace o modelu.....	21
4 Popis praktických měření.....	22
4.1 Použitá měřicí technika.....	22
4.2 Nevývaha oběžného kola.....	25
4.2.1 Odstranění nevývahy.....	25
4.3 Nesouosost.....	28
4.3.1 Odstranění nesouososti.....	28
4.4 Měření na převodovce.....	30
4.5 Vady způsobené řemenovým převodem.....	32
4.6 Vady způsobené mechanickým uvolněním.....	34
5 Měření vibrací v praxi.....	36
5.1 Poškození ložiska.....	36
5.2 Praktické příklady nevývahy.....	40
5.3 Nesouosost.....	42
6 Závěr.....	45
7 Použitá literatura:.....	47
8 Seznam obrázků.....	49

9 Seznam tabulek	51
10 Seznam příloh	52

Seznam použitých zkratk a symbolů

A	Axiální směr	-
ACC	Zrychlení vibrací	[m/s ²]
C	Citlivost snímače vibrací	[mV/g]
ČSN	Česká státní norma	-
H	Horizontální směr	-
ISO	International Organization for Standardization (mezinárodní organizace pro normalizaci)	-
IP65	Označení pro stupeň ochrany krytí	-
m	Hmotnost	[kg]
M4	Označení pro metrický závit pro průměr 4 mm	-
P	Výkon	[W]
RMS	Efektivní hodnota	-
SE	Spike Energy (metoda pro detekování vznikající závady v ložisku – měření špičkové energie)	[gSE]
t	Teplota	[°C]
V	Vertikální směr	-
atd.	A tak dále	-
fz	Zubová frekvence	[Hz]
gSE 1000	Analýza špičkové energie s aplikovaným hornopásmovým filtrem 1000 Hz	-
n	Otáčky	[ot/min]
T	Čas	[s]
v	Rychlost vibrací	[mm/s]

Úvod

Technická diagnostika je v dnešní době stále více se rozvíjejícím nástrojem údržby ve výrobních podnicích, a to hlavně z důvodu, že díky metodám technické diagnostiky snižujeme riziko vzniku náhlých poruch strojů. Nasazením metod technické diagnostiky můžeme předejít vzniku neplánovaných odstávek strojů. Neplánované odstávky způsobují nemalé finanční ztráty z důvodu vzniku prostojů výrobních linek a jsou nežádoucím jevem. Tento nežádoucí jev se snažíme minimalizovat implementováním metod technické diagnostiky do systémů údržby.

Cílem této diplomové práce je tedy navrhnout a sestavit funkční model, na kterém budou ukázány možné poruchy strojů, s kterými se můžeme setkat při měření v praxi a naučit se takto simulované poruchy včas detekovat, a tím zabránit vzniku náhlých poruch strojů. Pro detekci poruch strojů využijeme obor technické diagnostiky, který se zabývá měřením vibrací. Tento obor technické diagnostiky se nazývá vibrodiagnostika.

Vibrodiagnostika je jedna z metod technické diagnostiky. jedná se o metodu bezdemontážní diagnostiky, jejímž cílem je měření vibrací rotačních strojů s následnou analýzou naměřených vibračních signálů a na jejich základě určit objektivní stav strojního zařízení a odhalit případné nedostatky. Zvýšené vibrace mohou být způsobeny především nevývahou, špatným ustavením řemenic, špatným napnutím řemene, mechanickým uvolněním, poškozením ložisek a problémy s ozubenými koly v převodovce.

Model bude tedy sloužit jako trenažér pro identifikaci možných poruch strojů, na kterém budou použity metody technické diagnostiky s následnou verifikací poruch. Na modelu budou simulovány uvedené závady: nesouosost, nevývaha, mechanické uvolnění, ustavení řemenů, napnutí řemene, detekce poškozeného ložiska a poruchy ozubených kol.

Model, který dokáže demonstrovat základní typy poruch strojů, je neocenitelnou pomůckou pro reálnou ukázkou a zároveň výbornou pomůckou pro výuku studentů. Poslouží tak pro demonstraci vybraných poruch strojů a poukázání, jak se stroj při těchto poruchách projevuje, a čím jsou tyto poruchy způsobuje.

1 Koncept návrhu

Na začátku projektu nastaly dvě možné varianty řešení. První varianta spočívala v navržení a sestrojení úplně nového demonstračního modelu na měření vibrací. Druhá varianta měla za cíl navrhnout vylepšení již stávajícího řešení, kterým disponuje VŠB - TU Ostrava.



Obr. 1 Existující model na měření vibrací

Z praktického hlediska byla vybrána druhá varianta, jejíž řešení zahrnovalo rozšíření stávajícího modelu o další možnosti a funkce.

1.1 Popis existujícího modelu

Již existující model obsahoval hlavní části, jimiž jsou: modulární hliníková podstava, dvě ložiska, dvě oběžná kola, frekvenční měnič pro regulaci otáček, elektromotor pro pohon celého zařízení, posuvnou desku pod elektromotorem a převodovkou, která spojuje elektromotor s hnanou hřídelí.

Díky těmto částem šlo na tomto modelu již simulovat několik typů závad, mezi které patří nevývaha oběžného kola, nesouosost mezi motorem a hřídelí, poškození ložiska a nedostatečné mazání ložiska, mechanické uvolnění a nakonec poškození elektromotoru.

Jednou z výhod již existujícího modelu bylo, že byl postaven na modulární platformě a nebyl problém ho jednoduše přestavět nebo přidat další části, které by rozšířily model o další funkce. Úkolem bylo vymyslet, o jaké funkce stávající model rozšířit a jak je zakomponovat do stávajícího modelu.

1.2 Vylepšení stávajícího modelu

Bylo tedy zapotřebí přidat takové vylepšení, které umožní zkoumat i další možné poruchy, a to například: správné ustavení řemenic vůči sobě, správné napnutí řemene a zkoumat poruchy ozubených kol.

Úkolem práce bylo vyřešit, jak do stávajícího modelu zakomponovat tyto díly: hnací řemenici, hnanou řemenici, řemen a vícestupňovou převodovku.

2 Konstrukční návrh modelu

Hlavním cílem diplomové práce bylo navrhnout konstrukční prvky, které budou implementovány do stávajícího modelu. Tyto prvky a stávající model by měly splňovat následující kritéria, aby bylo možné identifikovat a simulovat možné poruchy strojů. Kritéria jsou zvolena tak, aby navržený model splňoval veškeré atributy a plnil svou funkci bez problémů.

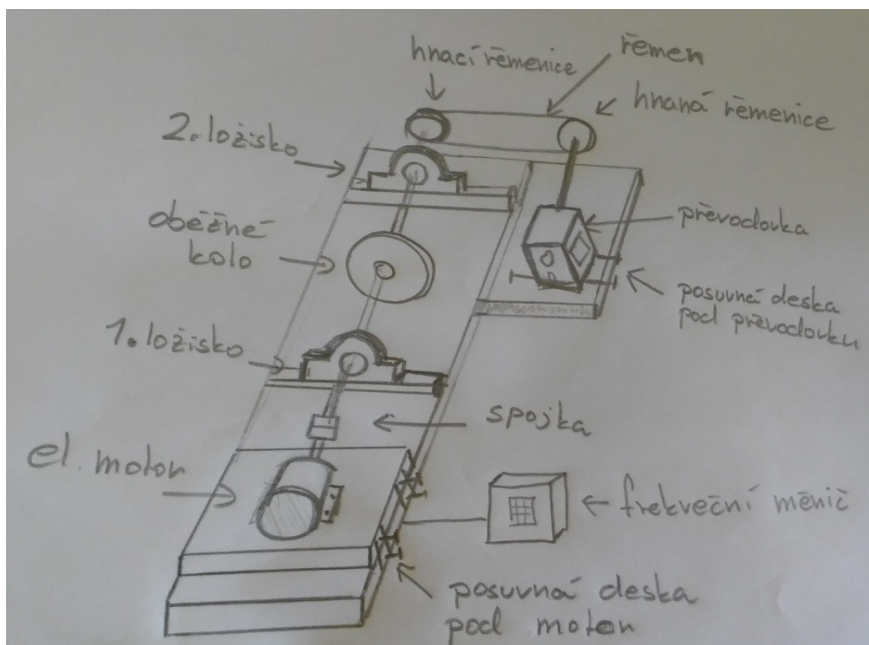
Požadovaná kritéria modelu:

- pevná modulární podstava na uchycení konstrukčních prvků
- možnost mobility celého modelu
- připojit již na existující model nově přidané funkční prvky
- model by měl obsahovat:
 - frekvenční měnič na regulaci otáček
 - elektromotor
 - nejméně dvě ložiska
 - oběžné kolo
 - řemenice
 - řemen
 - minimálně dvoustupňovou převodovku
 - ustavovací desku pod motor
 - ustavovací desku pod převodovku
 - spojku mezi motorem a hřídelí
 - stojan pro uchycení otáčkové sondy

Pro lepší nahraditelnost dílů, je snaha sestavit model z katalogových dílů, aby bylo v budoucnu možné případné poškozené díly jednoduše nahradit novými. Je nutné předpokládat, že některé specifické díly bude zapotřebí nechat vyrobit, nicméně optimální pro stavbu modelu bude minimalizace speciálních výroby potřebných dílů. Vhodnější variantou bude alternativní řešení pro stavbu modelu z dílců již existujících.

2.1 Náčrt

Na počátku bylo zapotřebí navrhnout, jak zakomponovat všechny potřebné díly do již existující části modelu (viz obr.1), aby bylo možno simulovat potřebné poruchy strojů, a aby původní i nové části modelu byly propojeny do jednoho funkčního celku.



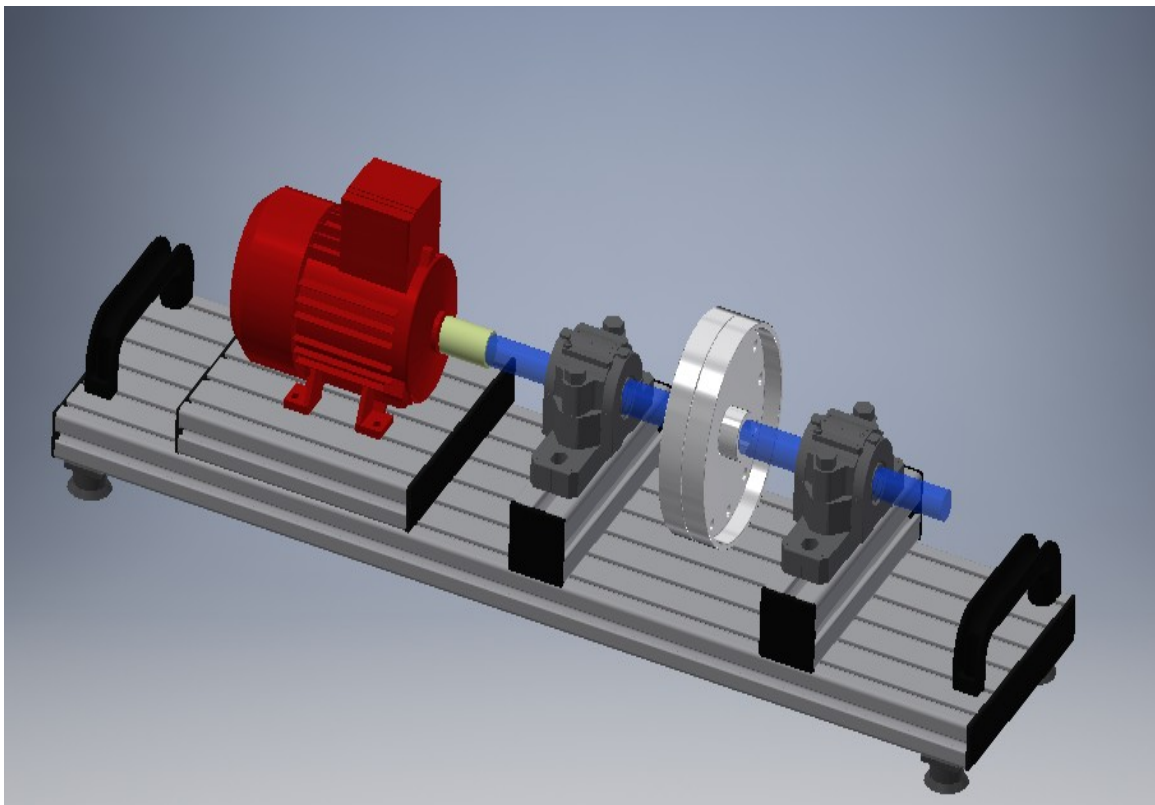
Obr. 2 Náčrt navrhnutého řešení modelu

Náčrtek obsahuje oproti původnímu modelu navíc hnací řemenici, hnanou řemenici, řemen, vícešupňovou převodovku, posuvnou desku pod převodovku a modulární podstavu pod převodovku, která bude připojena k původnímu modelu.

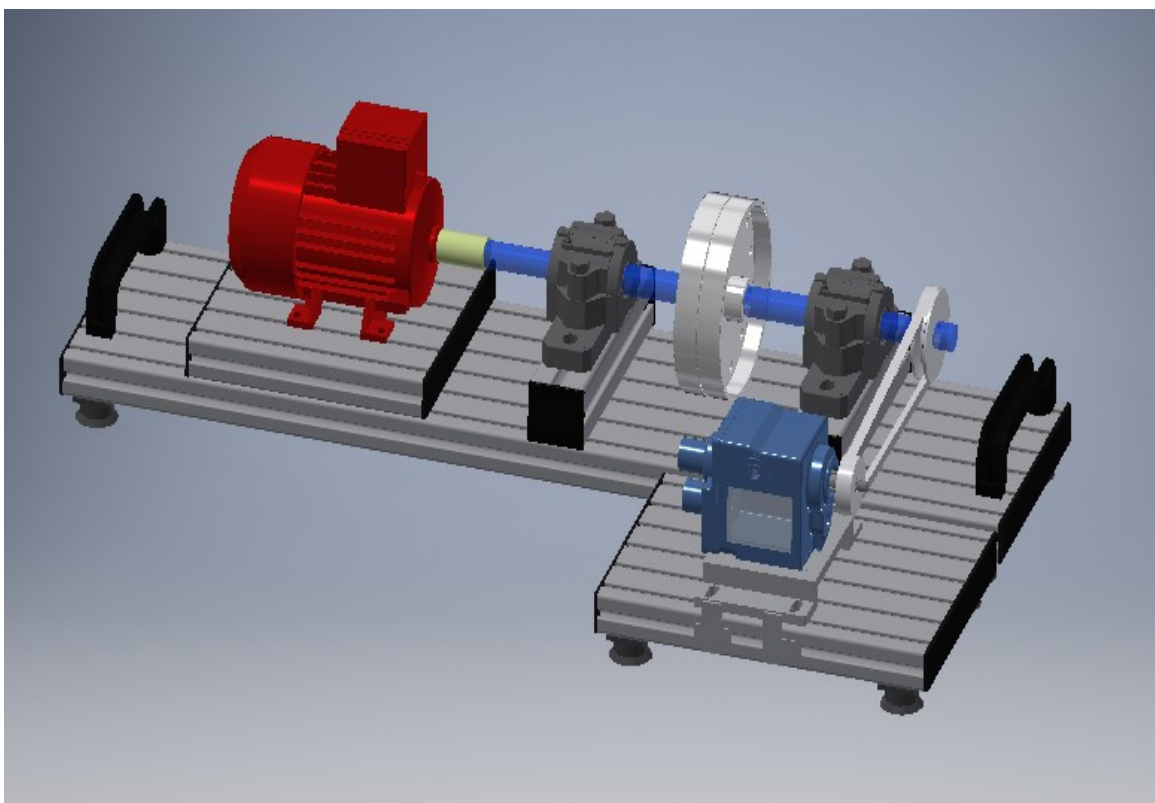
2.2 Vytvoření 3D modelu

Dalším fází procesu bylo vytvoření 3D modelu v reálném měřítku. Při tvorbě 3D modelu bylo vycházeno z katalogových dílů, aby byla zajištěna unifikace jednotlivých dílů, a tím byla zajištěna modulárnost celé platformy.

Z porovnání obrázku číslo 3 a 4 je patrné, že nedošlo ke změně rozložení původního modelu. Nově byla přidána platforma s převodovkou a řemenovým převodem, která byla napojena na původní model. Díky modulární platformě působí model jako jeden celek a je ho možné kdykoliv poupravit dle potřeby. Toto řešení je výhodné pro budoucí přestavby a konfigurace celého modelu.



Obr. 3 Zobrazení 3D původního modelu



Obr. 4 Zobrazení 3D modelu s vylepšením

3 Stavba modelu

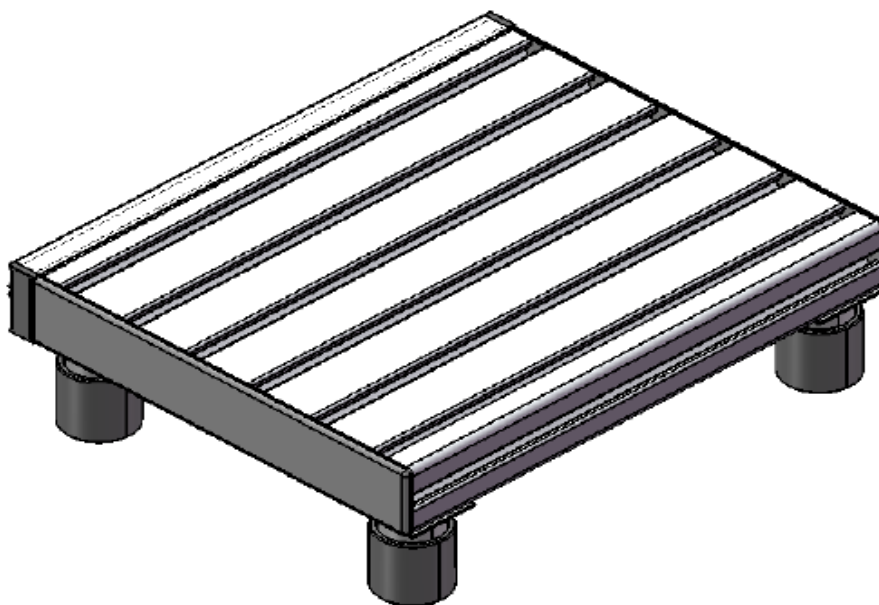
Dalším krokem po vytvoření 3D modelu, bylo potřeba objednat, popřípadě vyrobit potřebné díly k výrobě navrženého rozšíření modelu.

3.1 Podstava

Nejprve bylo potřeba objednat podstavu pod převodovku, která by šla napojit na již existující podstavu původního modelu. Byl tedy vytipován díl od stejného výrobce, který byl použit na podstavu původního modelu. Jednalo se o hliníkový profil od výrobce Item.

Tyto podstavy mají výhodu, že disponují mnoha způsoby, jak připojit jednotlivé díly k podstavě, a to díky drážkám, které jsou v tomto případě od sebe vzdálené 20 mm.

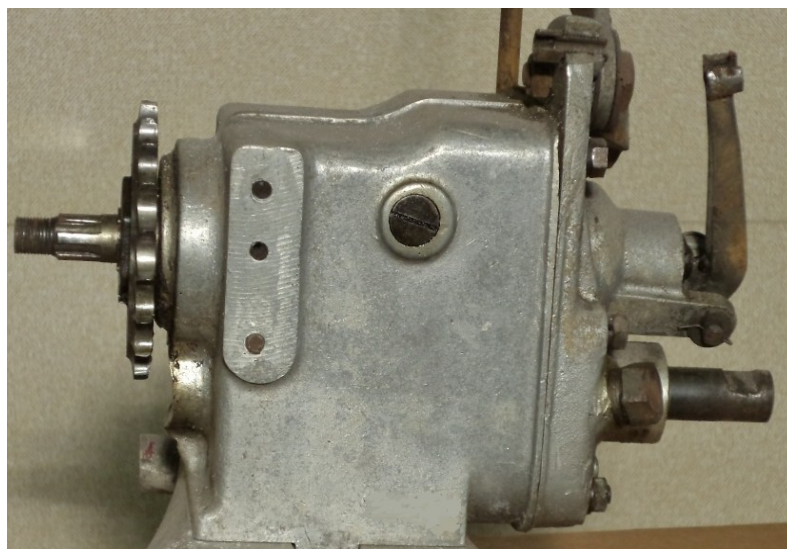
Rozměry požadované podstavy z hliníkových profilů byly 300 x 240 mm. K podstavě byly dále dodány regulační nohy, na kterých lze regulovat výšku podstavy. Nová podstava bude k původní připojena pomocí spojovací lišty, kterou můžeme vidět vlevo na obrázku číslo 5.



Obr. 5 Podstava nové části pod převodovku

3.2 Převodovka

Dále bylo zapotřebí vybrat vhodnou vícestupňovou převodovku. Jako nejvhodnější pro účely zkoumání vad ozubených kol byla vybrána starší převodovka z Jawy Special. Tato převodovka splňovala všechny potřebné parametry, jako je přítomnost více rychlostí, a také její rozměr. V našem případě se jedná o třístupňovou převodovku.



Obr. 6 Převodovka z Jawy Special

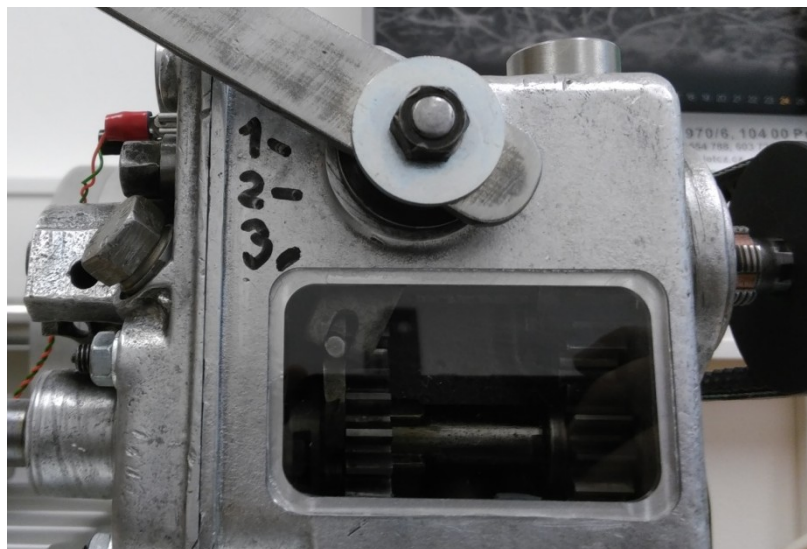
Podařilo se zakoupit zachovalou převodovku z Jawy Special příznivou cenu. Aby byla převodovka vhodná pro naše účely, došlo k repasování některých dílů, například valivého ložiska, zajišťovacích matic převodovky, atd. Dále bylo zapotřebí očistit a přeleštit vnitřní a vnější díly převodovky.

Následovalo několik dalších modifikací, které rekonstruovanou převodovku pro demonstrační účely značně vylepšilo. Byl přidán nahlížecký otvor do převodovky a vnitřní osvětlení, které poslouží pro vizuální kontrolu vnitřku převodky.



Obr. 7 Vnitřní led osvětlení převodovky

Nahlížečský otvor v převodovce je zajištěn plexisklem o síle 2 mm, aby nedošlo ke vniknutí cizího tělesa do převodovky během chodu zařízení.



Obr. 8 Nahlížečský otvor do převodovky

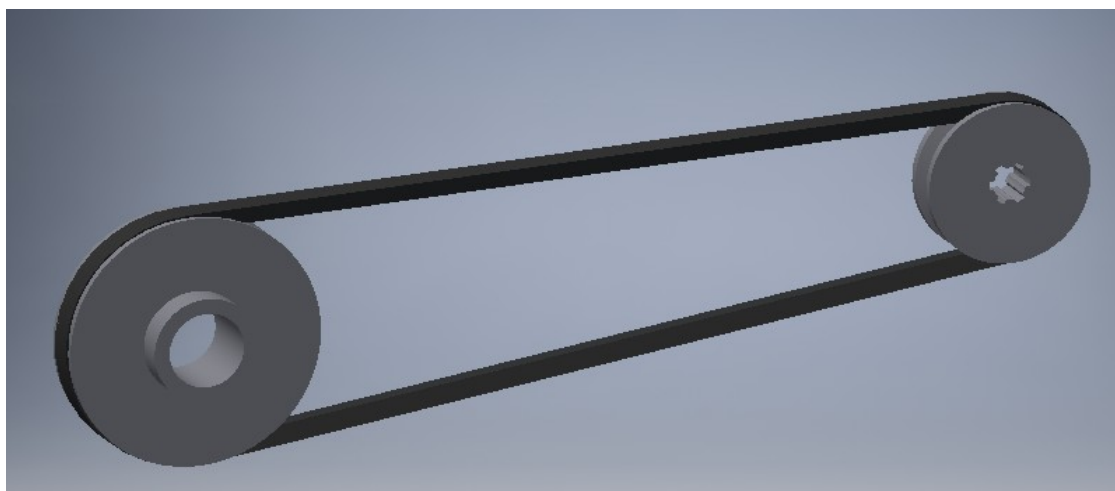
Převodovka obsahuje celkem tři rychlostní stupně. Řazení probíhá díky jednomu pohyblivému soukolí. Na obrázku 9 jsou ukázány vnitřní části převodovky. Je také uveden popis počtu zubů pro případný výpočet zubových frekvencí a převodových poměrů. Dále je také znázorněna vstupní a výstupní hřídel převodovky. Malé kolo umístěné vedle kola 1 sloužilo pro nakopávací startér motorky.



Obr. 9 Zobrazení vnitřních částí převodovky s popisem

3.3 Řemenový převod

Bylo zapotřebí vyřešit převod mezi převodovkou a hnací hřídelí, jako ideální řešení byl zvolen klasický řemenový převod. Průměr hnací řemenice je 85 mm a průměr hnané řemenice je 56 mm. Jedná se o řemenice typu SPZ pro klínový řemen. Převodový poměr mezi hnanou a hnací řemenicí je tedy zvolen 1:1,52. Osová vzdálenost mezi hnací hřídelí a vstupní hřídelí od převodovky je 275 mm. Řemen byl použit SPZ klínový o délce 772 mm. Hnací řemenice je k hřídeli připevněna díky zajistnému šroubu M4, hnaná řemenice je upevněna na hřídel převodovky pomocí rovnobokého drážkování a zajištěna maticí.



Obr. 10 Řemenový převod SPZ

3.4 Posuvná deska pod převodovku

Posuvná deska pod převodovku byla zvolena z důvodu, aby šlo snadno regulovat osovou vzdálenost mezi hnací hřídelí a převodovkou. Díky tomuto řešení půjde dobře simulovat napínání převodového řemene.



Obr. 11 Posuvná deska pod převodovku

3.5 Nastavitelné rameno otáčkové sondy

Dále bylo zapotřebí vyřešit uchycení otáčkové sondy k podstavě modelu s možností regulace její polohy. Byl navržen kloubový stojánek, který umožňuje velkou variabilitu nastavení požadované polohy otáčkové sondy. Otáčková sonda je uchycena ke stojánku pomocí silného neodymového magnetu, to zaručuje pevné spojení a rychlou rozpojitelnost otáčkové sondy od stojánku.

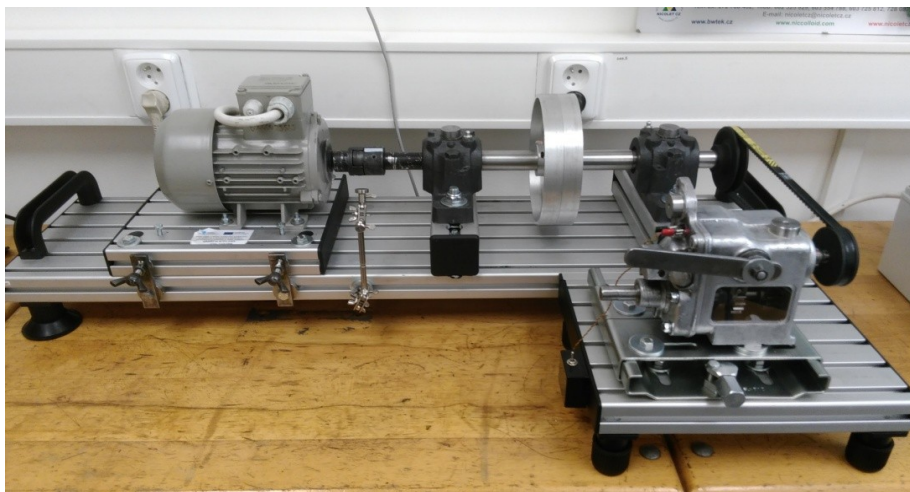


Obr. 12 Nastavitelné rameno otáčkové sondy

3.6 Zkompletování modelu

Po vytypování a vyrobení všech potřebných dílů byl model zkompletován do finální podoby dle konstrukčního návrhu. Zkompletovaný model splňuje všechna požadovaná kritéria, která byla definována v kapitole 2.

Při stavbě modelu nenastaly žádné velké komplikace, které by byly důsledkem nevhodnosti konstrukčního návrhu. Tímto lze říci, že konstrukční návrh byl vyhovující. Nemuselo tedy dojít ke změně celého konceptu návrhu, a tento mohl být úspěšně aplikován.



Obr. 13 Finální podoba modelu

3.6.1 Souhrnné informace o modelu

Tabulka 1 Základní informace o sestaveném modelu.

Pracovní rozměr základny	1008 x 498 mm
Celková váha modelu	36 kg
Základní parametry motoru	Výkon: Siemens 1LA7070-4AB, 0,25 kW, 4 -pólový, asynchronní motor, hmotnost 4,8 kg
Převodovka	Jawa speciál, třístupňová
Typ převodu	Řemenový převod SPZ, převodový poměr 1,52, klínový řemen Super HC MN - SPZ 772 MN
Napínání řemene	Pomocí posuvné desky pod převodovkou
Typy ložisek předlohy hřídele	ZKL 1206K
Spojka	Hvězdicová spojka
Ukotvení	Volně na patkách
Frekvenční měnič	T-verter - E2-203-H1F, 220V, 2,2 kW
Modulární podstava	Ano

Tabulka 2 Souhrnné informace o ceně jednotlivých dílů

Popis	Cena s DPH
Hliníková podstava celého modelu, hřídel předlohy a příslušenství (madla, ochranné krytky, plexisklo)	19 000 Kč
Elektromotor - Siemens 1LA7070-4AB	2 000 Kč
Frekvenční měnič - T-verter + plastová krabice	4 500 Kč
Spojka	400 Kč
Ložiska ZKL 1206K (2 kusy) + ložiskové půlené domky SKF	6 500 Kč
Převodovka	2 000 Kč
Ložisko do převodovky - SKF 6204-2Z	184 Kč
Posuvná deska pod převodovku	700 Kč
Klínový řemen, SPZ 772 MN	222 Kč
Klínové řemenice hnaná SPZ, 56 mm	270 Kč
Klínové řemenice hnací SPZ, 85 mm	350 Kč
Stojan na optickou sondu s magnetem	150 Kč
Spojovací a ostatní materiál (matice, šrouby, podložky, silikon)	800 Kč
Díly pro osvětlení převodovky	200 Kč
Mazivo do převodovky - NLGI-2, 350g	74 Kč
Cena celkem	37 350 Kč

4 Popis praktických měření

Informace pro tuto kapitolu byly použity z literatury [2], [3], [4], [5], [11], [12]

Tato kapitola se bude zabývat popisem praktických měření, která mohou být na modelu prováděna. Budou zde popsány projevy různých závad pomocí vibrodiagnostických metod, jako jsou například nevývaha, nesouosost, poruchy ozubených kol, nesouosost řemenic, nedostatečně napnutý řemen a mechanické uvolnění.

4.1 Použitá měřicí technika

Měřicí techniku a softwary, kterými byla potřebná měření prováděna, zapůjčila Vysoká škola Báňská a firma HEISTECH.

4.1.1 Enpac 2500

Enpac 2500 je analyzátor vyrobený firmou Allen Bradley (Rockwell Automation). Využívá se jako analyzátor vibrací pro pochůzkové měření vibrací. Toto zařízení disponuje dvěma vstupními kanály pro připojení dvou snímačů vibrací, dále obsahuje port pro připojení otáčkové sondy, který umožní měřit fázi a otáčky měřeného zařízení. Tento analyzátor má vlastní vestavěný laserový snímač a port RS-232, taktéž USB port na přímé propojení s počítačem. Nahraná data z měření jsou ukládána do interní paměti přístroje nebo do paměťové SD karty.

Přístroj Enpac 2500 je konstrukčně navržen, aby odolal náročným podmínkám měření a splňoval normu IP 65. Může se tak využít v prašném a vlhkém prostředí. Měřicí přístroj je schopen pracovat v teplotním rozsahu od -10° do 50°C .



Obr. 14 Měřicí zařízení Enpac 2500

Jako snímač vibrací ke sběru dat byl použit piezo akcelerometr CTC - AC26-1A. Citlivost snímače vibrací je 100 mV/g. Uchycení snímače k měřenému přístroji je řešeno pomocí magnetické základny.



Obr. 15 Akcelerometr použitý při měření

K vyhodnocení naměřených dat z Enpacu 2500 je použit software Emonitor, který umožní analyzovat naměřená data a zobrazit vybraná spektra k bližšímu zkoumání a posuzování daného problému.

4.1.2 Optická sonda

Optická sonda z řady TB2 slouží k měření otáček a fáze. Určení otáčkové frekvence měřeného zařízení je jednou z nejdůležitějších informací při měření. Pomocí otáčkové frekvence jsme lépe schopni identifikovat danou poruchu zařízení. Měření fáze se využívá například při vyvažování oběžného kola, kde potřebujeme znát v jakém úhlu má stroj nejdominantnější vibrace. Otáčková sonda je přímo propojena s přístrojem a jsme schopni okamžitě odečíst dané údaje, případně můžeme využít otáčkovou sondu samostatně bez analyzátoru vibrací, jen pro sledování otáček měřeného zařízení.



Obr. 16 Optická sonda z řady TB2 [15]

4.1.3 Easy Laser

Přístroj Easy Laser slouží pro ustavování zařízení, využívá se hlavně při montážních a servisních pracích. Při zanedbání ustavení dochází často na zařízení ke vzniku vysokých vibrací, tyto pak mají negativní vliv na chod a životnost celého zařízení. Proto je nezbytné, aby bylo zařízení řádně ustaveno.

Pro perfektní ustavení se nejčastěji používá technika, která pracuje na laserovém principu, stejně jako použitý Easy Laser. Tento přístroj je schopný ustavit zařízení na 0,01 mm, což je pro průmyslové stroje dostačující.

Easy Laser vyniká velice jednoduchým ovládáním a obsluhou. Pro měření využívá dva laserové snímače polohy, komunikační kabely, stativy pro uchycení snímačů a vyhodnocovací jednotku.



Obr. 17 Kufr s Easy Laserem a příslušenství

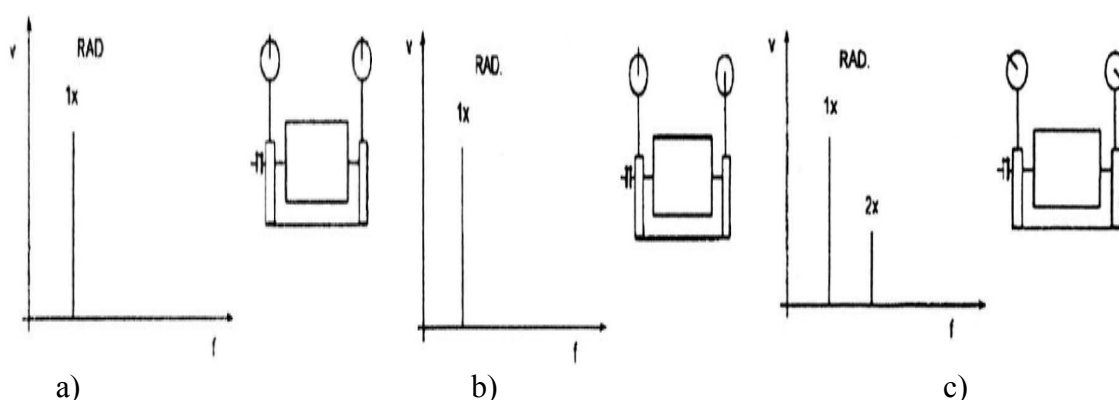
V základním módu měří Easy Laser hodinovou metodou. Tato metoda využívá ručičkové hodiny pro určení polohy snímače. V prvním kroku dá přístroj pokyn, ať je snímač umístěn do polohy devíti hodin, v dalším kroku je umístěn snímač do polohy dvanácti hodin a v posledním případě do polohy tří hodin. Poté přístroj vyhodnotí naměřené údaje a vypočte potřebné korekce, které je nutné provést pro perfektní ustavení zařízení.

Easy Laser obsahuje i další módy, které například umožní měřit tam, kde není prostor pro provedení hodinové metody. Pro správný výpočet korekcí potřebuje Easy Laser, aby byly snímače nakloněny minimálně o 40° celkem.

4.2 Nevývaha oběžného kola

Nevývaha oběžného kola je jedna z nejčastějších poruch rotačních zařízení, které obsahují oběžné kolo. Týká se to například ventilátorů a dmychadel. Nevývaha je způsobená nehomogenním rozložením hmoty na oběžném kole. Nevývahu můžeme rozdělit na statickou, momentovou, dynamickou, případně jejich kombinace.

Nevývaha oběžného kola se projevuje ve spektru rychlostí vibrací dominantní špičkou na otáčkové frekvenci měřeného zařízení a amplituda na otáčkové frekvenci je obrazem velikosti nevývahy. Na obr. 16 jsou znázorněna spektra rychlostí vibrací pro jednotlivé druhy nevývahy.



Obr. 18 Znázorněné nevývahy ve spektru, a) statická nevývaha, b) momentová nevývaha, c) dynamická nevývaha [2]

4.2.1 Odstranění nevývahy

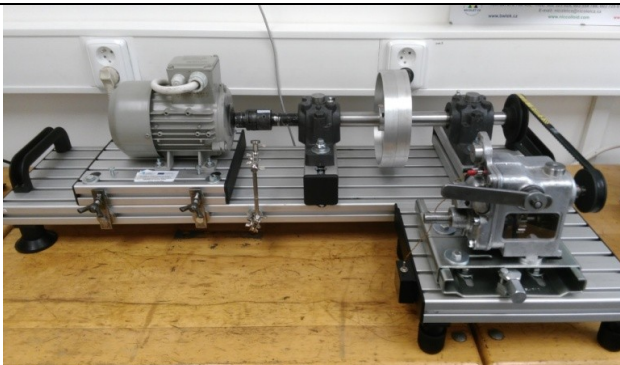
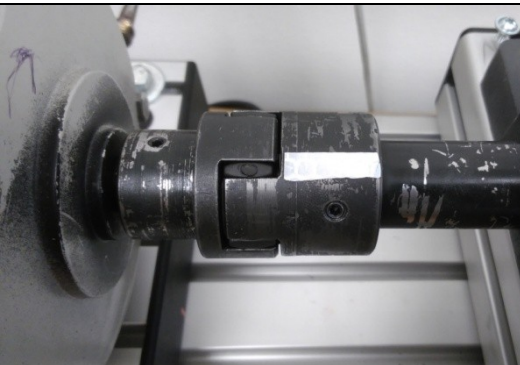

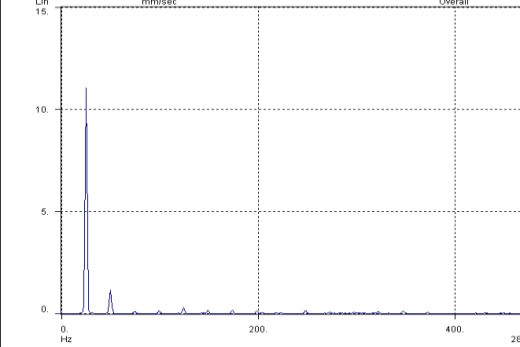
V této kapitole bude popsán postup, jak odstranit nevývahu bez nutnosti demontáže oběžného kola na zkonstruovaném modelu.


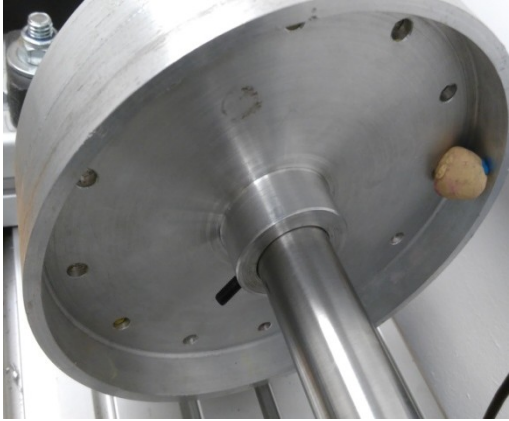



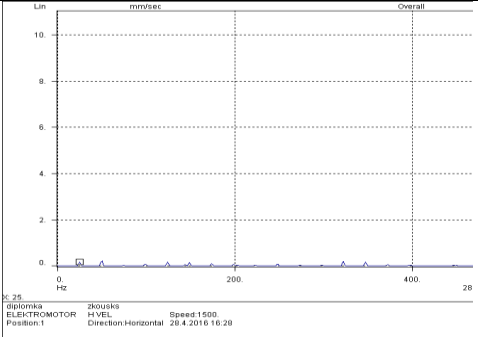
V první řadě byl spuštěn stroj a změřeny vibrace pomocí Enpacu 2500. Z výsledku měření vyplynulo, že stroj nevykazuje známky nevývahy. Oběžné kolo demonstračního modelu bylo pro tyto potřeby řádně rozváženo přidáním plastelíny do určitých míst. Po připevnění závaží následovalo opětovné měření vibrací. Po změření vykazovala spektra vibrací známky nevývahy viz. obr. 19 d). Na spektru je patrná dominantní špička na otáčkové frekvenci 25 Hz. Pro změření fáze byla použita optická sonda z řady TB2.

Takto vzniklá nevývaha se dá odstranit následujícím postupem:

- umístit snímač vibrací na ložiskový domek a nalepit referenční fázovou značku, popřípadě určit počet lopatek
- provést referenční měření
- umístit zkušební závaží o zvolené váze do zvoleného místa, poté provést měření vibrací
- pomocí programu vypočítat potřebné korekční závaží o určité hmotnosti a umístit ho do určité polohy, po umístění provést měření vibrací
- je-li požadované vyvažování v pořádku, tak ho ukončíme, pokud jsou hodnoty vibrací stále vysoké, pokračujeme v dalším korekční kroku

Pro lepší představu výše zmíněného postupu je vytvořen obrázkový postup bod po bodu na obr. 19.

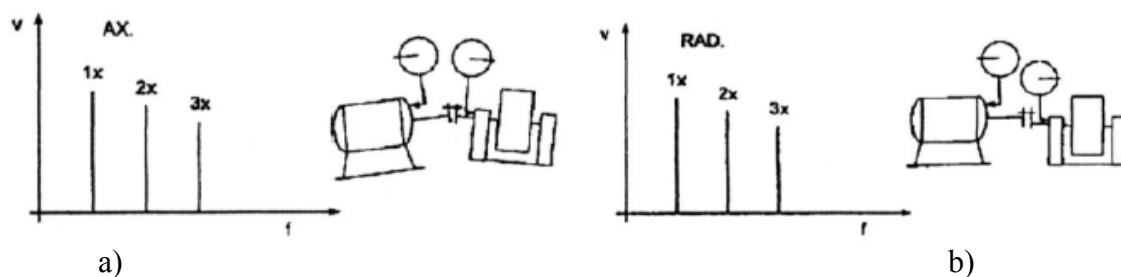
	
<p>a) Udělat obhlídku měřeného zařízení a určit měřicí místa pro měření (1.měřicí bod na elektromotoru, 2 a 3 na ložiskových domcích předlohy, 4 měřicí bod na převodovce.</p>	<p>b) Umístit fázovou značku pro snímání otáček a fáze.</p>
	
<p>c) Provést referenční měření.</p>	<p>d) Ve spektru rychlostí vibrací detekována nevývaha - dominantní špička na otáčkové frekvenci (naměřeno 11,4 mm/s).</p>

	
<p>e) Určit si počet lopatek, popřípadě děr pro umístění závaží a směr otáčení kola.</p>	<p>f) Pro vyvážení bylo potřeba umístit zkušební závaží na oběžné kolo, aby mohlo být pomocí softwaru vypočteno korekční závaží, které odstraní nevývahu oběžného kola.</p>
	
<p>g) Po umístění zkušebního závaží provést měření, výsledné údaje zapsat do příslušného programu pro výpočet korekčního závaží.</p>	<p>h) Umístění korekčního závaží o dané hmotnosti a do daného místa, která nám software vypočetl.</p>
	
<p>ch) Provést měření po umístění korekčního závaží.</p>	<p>i) Provést kontrolu výsledných hodnot a spekter, z výsledku je patrné, že nevývahu se podařilo odstranit (naměřené hodnoty 0,5 mm/s). Pokud by hodnoty byly stále vysoké, je potřeba provést další měření pro určení dalšího korekčního závaží.</p>

Obr. 19 Vyobrazení postupu vyvažování

4.3 Nesouosost

Pohonná část zařízení a pracovní část jsou často propojeny pomocí spojek. Při spojení pomocí spojek může docházet k nesouososti spojených hřídelí. V praxi se můžeme setkat s úhlovou nesouosostí, paralelní nesouosostí, nebo jejich kombinací. Nesouosost se projevuje ve spektru rychlostí vibrací na otáčkové frekvenci doprovázené s harmonickými násobky. Na obrázku 20 jsou příklady, jak by měla vypadat nesouosost ve spektrech.



Obr. 20 Znáznorněné nesouososti ve spektru, a) úhlová nesouosost, b) paralelní nesouosost [2]

4.3.1 Odstranění nesouososti

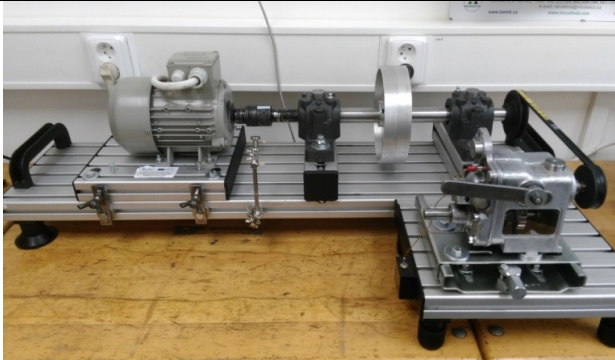
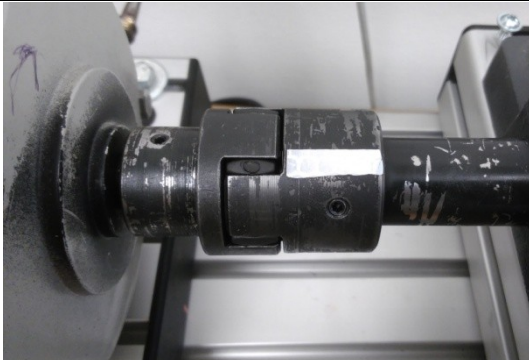
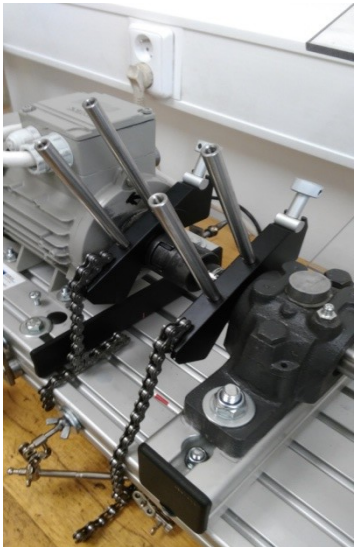

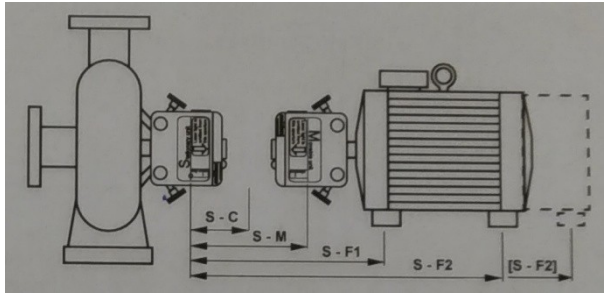
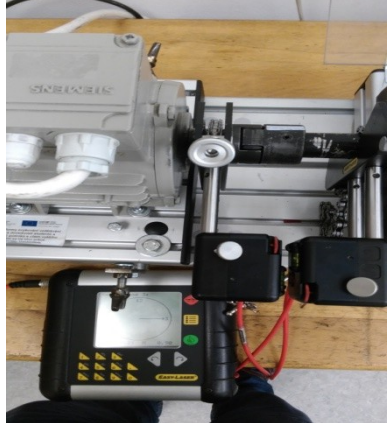
Tato kapitola se bude zabývat způsobem odstranění vzniklé nesouososti v provozních podmínkách. Pro řešení tohoto problému, bude využit již výše zmíněný přístroj Easy Laser (viz kapitola 4.1.3). Pomocí tohoto přístroje lze snadno odstranit nesouosost v provozních podmínkách.

Po detekování nesouososti je potřeba udělat následně uvedené kroky pro její úspěšné odstranění:

- umístit snímače pro určení polohy mezi spojku na hnanou hřídel a na hnací hřídel
- nastavit laserový paprsek tak, aby směřoval na terčík druhého snímače
- po korekci snímačů se v přístroji vybere požadovaný typ uložení a zadají se požadované rozměry jako jsou: rozteč patek elektromotoru, vzdálenost spojky od patky, snímače od patky, atd.
- po zadání všech údajů se může začít měřit
- z naměřených údajů přístroj vypočte požadované korekce, které je potřeba provést pro řádné ustavení zařízení

- po provedení korekcí se provede kontrolní vibrodiagnostické měření, z kterého se určí, zda byly korekce pro ustavení dostatečné

Pro lepší představu je vyobrazen pracovní postup ustavování na zkušebním modelu vibrací.

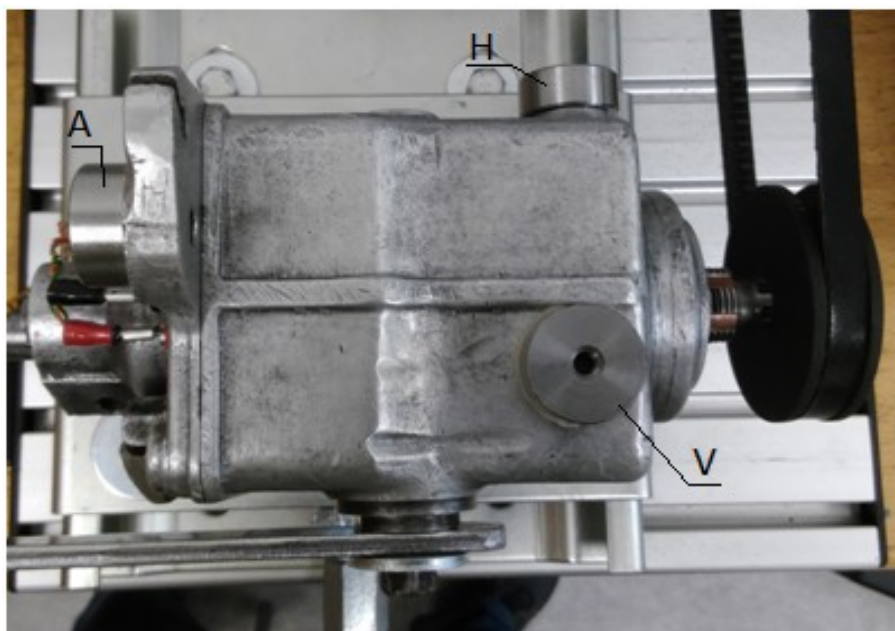
	
<p>a) Udělat prohlídku, zda je dostatek prostoru pro umístění stativu na snímače u spojky</p>	<p>b) Z obrázku je patrné, že je dostatek místa pro umístění laserových snímačů na hřídel elektromotoru a na hřídel předlohy</p>
	
<p>c) Instalace stativů pro laserové snímače</p>	<p>d) Umístění snímačů na stativ a seřízení laserového paprsku</p>
	
<p>e) Odměřit a zadat do přístroje požadované rozměry</p>	<p>f) Po zadání všech rozměrů provést samotné měření, postupovat dle pokynů na zařízení</p>

	
<p>g) Po měření vypočte zařízení korekce, které je potřeba udělat pro ustavení zařízení</p>	<p>h) Po provedení korekcí provést kontrolní měření vibrací a zhodnotit výsledky, zda byla nesouosost dostatečně odstraněna</p>

Obr. 21 Vyobrazení postupu vyvažování

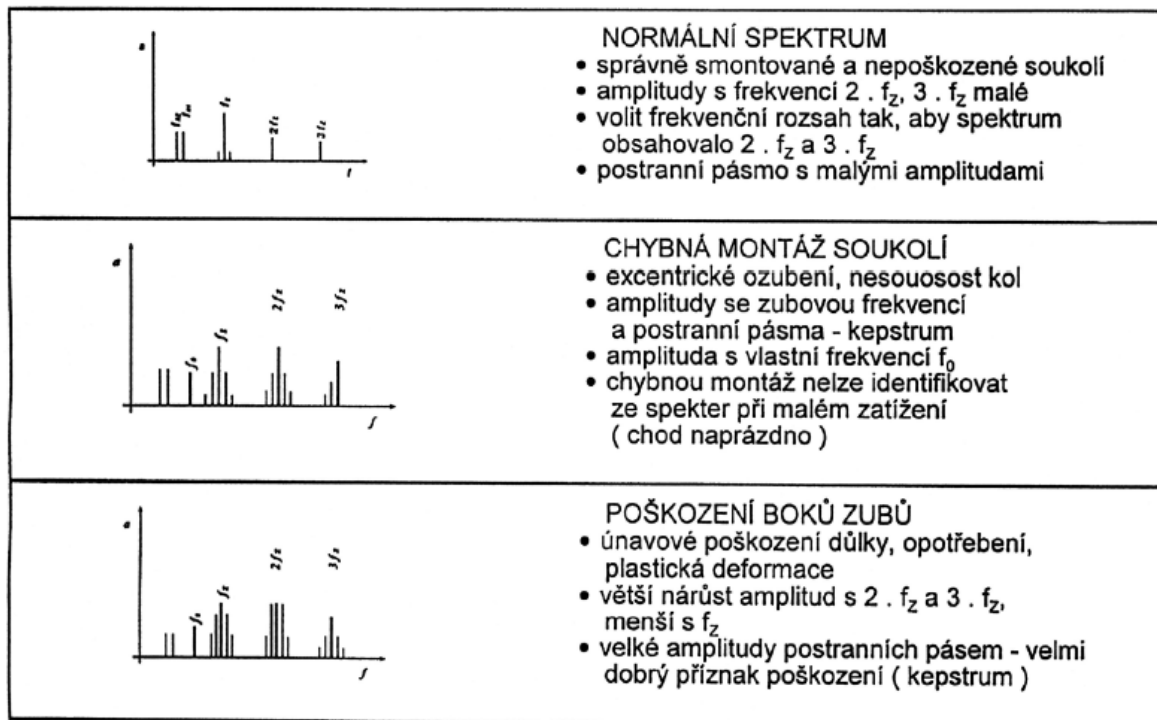
4.4 Měření na převodovce

Sestavený model obsahuje vícestupňovou převodovku, na které lze zkoumat a simulovat různé poruchy ozubených kol. Díky tomu lze na zařízení provádět různé experimenty. Na převodovku byly umístěny tři měřicí body, první bod v horizontálním směru, druhý bod v ve vertikálním směru a třetí bod v axiálním směru. Přesné rozmístění měřicích bodů je znázorněno na obrázku 22.



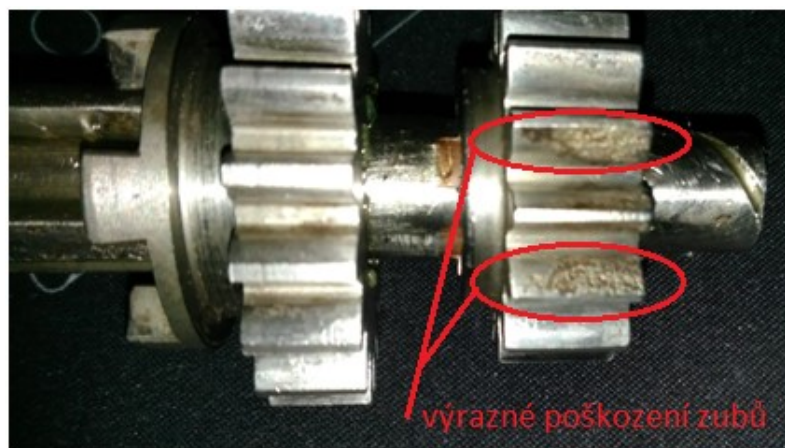
Obr. 22 Pohled shora na převodovku, H - horizontální směr, V - vertikální směr,
A - axiální směr

Na obrázku 23 jsou vyobrazeny základní poruchy ozubených kol, které se projevují ve spektrech vibrací, a co je způsobuje. Tyto poruchy ozubených kol lze demonstrovat na zhotoveném modelu. Označení " f_z " je vyjádření zubové frekvence daného ozubeného kola. Pro indikaci poškození se sleduje hlavně vývoj postranních pásem u zubové frekvence ozubeného kola.



Obr. 23 Základní poruchy ozubených kol [2]

Jelikož je převodovka staršího data výroby, má už zjevné projevy opotřebení na zubech ozubených kol. Na obrázku 24 jsou znázorněná některá poškození ozubených kol převodovky. Tato poškození jsou vhodná pro detekování poškození ve spektrech vibrací, dále mohou být využita při různých experimentech měření vibrací a zkoumání projevů vad na ozubených kolech.



Obr. 24 Detail ozubeného kola s poškozenými zuby

4.5 Vady způsobené řemenovým převodem

Vady týkající se řemenového převodu jsou například nesouosost hnací řemenice vůči hnané řemenici, nebo špatně napnutý řemen. Nesouosost řemenic způsobuje, že dochází k většímu opotřebení převodového řemene. Opotřeбенý řemen pak neplní správně svou funkci a má negativní dopad na celé zařízení. Může dojít k vytahání řemene, který tím ztratí svoje vlastnosti, v nejhorším případě může dojít k samotnému přetržení převodového řemene, což způsobí neplánovanou odstávku celého zařízení.

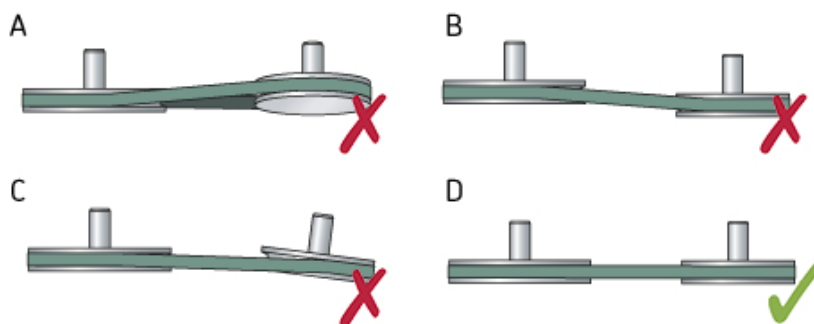
Pro správnou funkci řemenového převodu, je tedy potřeba zajistit souosost řemenic vůči sobě a mít správné napnutí řemene. Pro tyto případy existují zařízení, kterými jdou tyto úkony jednoduše provést.

Jedno ze zařízení na ustavení řemenic, která se používají při průmyslových nasazeních, je například přístroj TKBA 10 od firmy SKF. Tento přístroj využívá dva snímače, které pracují s laserovým paprskem. Přichycení snímačů je řešeno pomocí dvou silných magnetů.



Obr. 25 TKBA 10 při praktické aplikaci [16]

Toto zařízení pomůže identifikovat typ nesouososti a určit korekce pro jeho odstranění. Na obrázku 26 jsou uvedené příklady, k jakým typům nesouososti může mezi řemenicemi dojít.



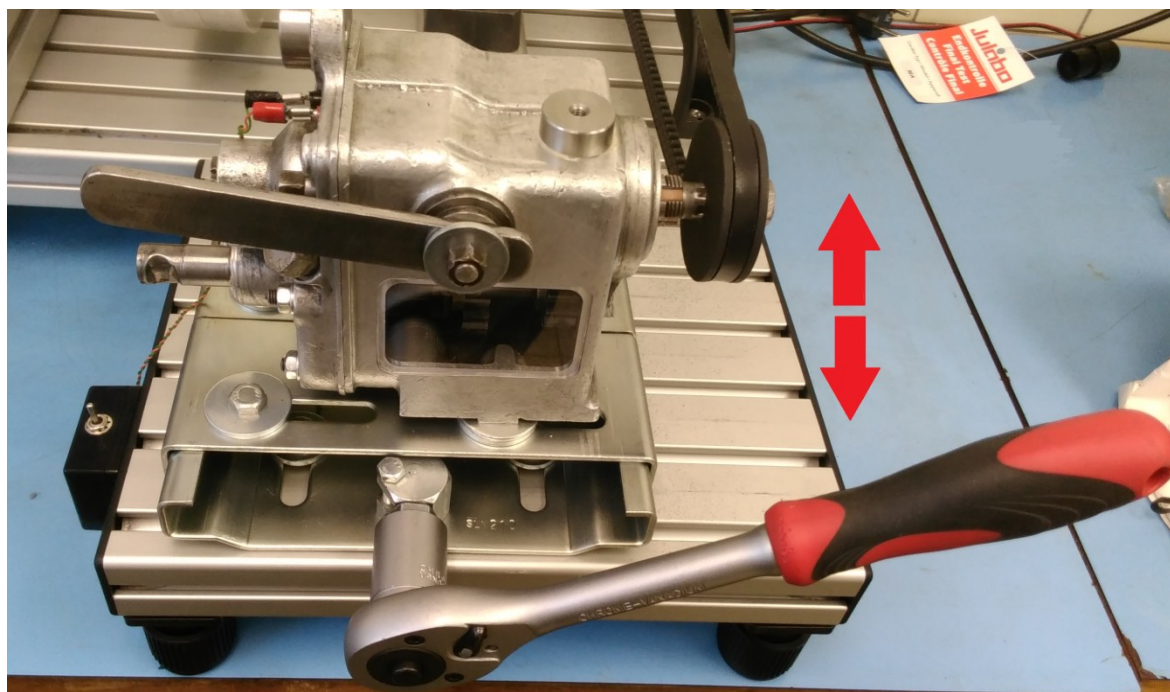
Obr. 26 A) Vertikální úhlová nesouosost, B) Horizontální úhlová nesouosost, C) Rovnoběžná nesouosost, D) Správné ustavení řemenic [17]

Pro správné napnutí řemene se v praxi nejčastěji využívají mechanické napínáky řemenů nebo přístroje, které měří frekvenci řemenů, jako například přístroj SKF PHL FM 10/400. Ten je schopný na základě naměřené frekvence řemene a zadání základních údajů spočítat, jaká síla je ještě potřeba k dostatečnému napnutí řemene.



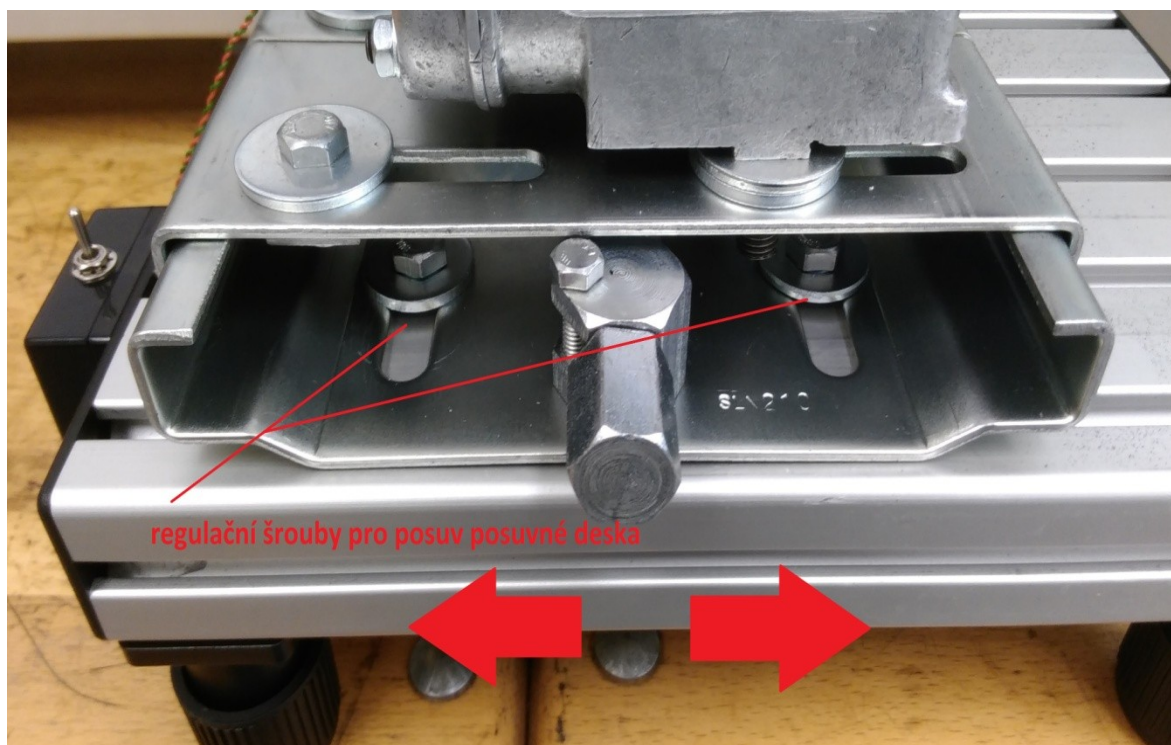
Obr. 27 SKF PHL FM 10/400 při praktické aplikaci [16]

Na modelu lze snadno regulovat napnutí řemene. Pro tento účel byla pod převodovku umístěna posuvná deska. Tato deska umožňuje regulovat napnutí řemene pomocí odtahového šroubu. Celý princip je ukázán na obrázku 28.



Obr. 28 Pomocí gola klíče dochází k regulaci napnutí řemene

Regulace funguje tak, že se pohybuje celou posuvnou deskou, na které je připevněná převodovka. Tím se pohybuje i hnaná řemenice řemenového převodu a mění se poloha vůči hnací řemenici



Obr. 29 Naznačené regulační šrouby pro regulaci souososti řemenic

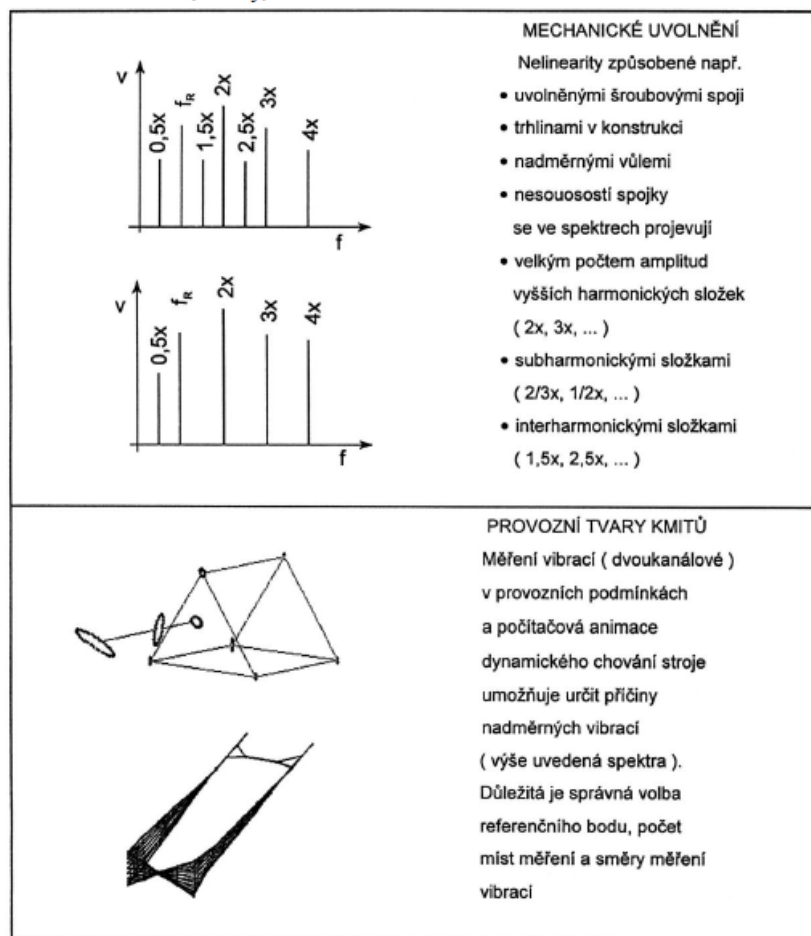
4.6 Vady způsobené mechanickým uvolněním

Mechanické uvolnění jsou způsobeny, jak název napovídá uvolněním některých částí strojů. Ve většině případu se jedná o uvolněné šrouby, nebo prasklé konstrukce daného zařízení.

Pro lepší lokalizaci mechanického uvolnění se využívá například metoda provozních tvarů kmitů. Ta spočívá v tom, že na daném zařízení zvolíme několik měřicích bodů, aby vytvořily geometrický model měřeného objektu. Následně se v každém bodě změří amplituda a fáze kmitavého pohybu ve všech směrech. Veškerá naměřená data se zahrnou do příslušného softwaru, který získaná data vyhodnotí. Výsledkem je vizualizovaný pohyb stroje na svých provozních otáčkách, přičemž interakce mezi jednotlivými měřicími body nám pomáhají odhalit případnou příčinu vibrací.

Na obrázku 30 jsou znázorněna spektra, která jsou projevem mechanického uvolnění. Na spektrech je patrné, že projevy mechanického uvolnění jsou doprovázeny subharmonickými a harmonickými násobky otáčkové frekvence zařízení.

Dále je na obrázku znázorněný příklad geometrického modelu pro měření provozních tvarů kmitů, který je díky počítačové animaci a pomocí zadaných hodnot rozpohybován. Díky animaci je pak snadnější lokalizace místa, které je z nějakého důvodu uvolněné.



Obr. 30 Spektra mechanického uvolnění a geometrický model pro měření provozních tvarů kmitů [2]

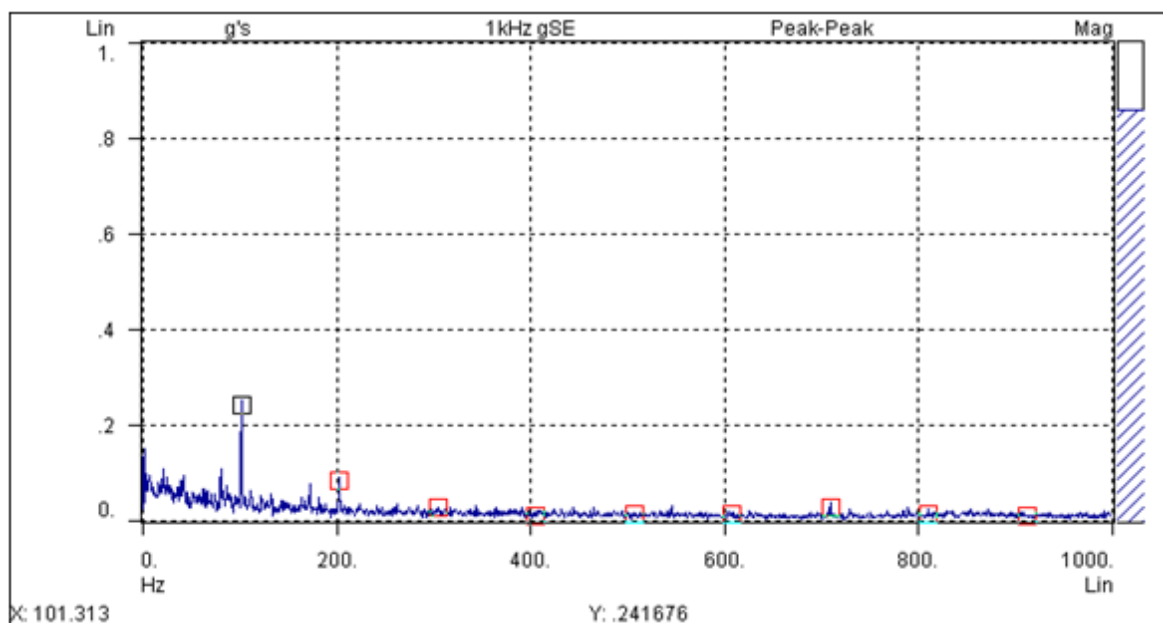
5 Měření vibrací v praxi

V této kapitole budou popsána poškození strojů, se kterými jsem se setkal při měření v reálném provozu. Bude se jednat o poškození, která byla zachycena pomocí vibrodiagnostických metod měření.

5.1 Poškození ložiska

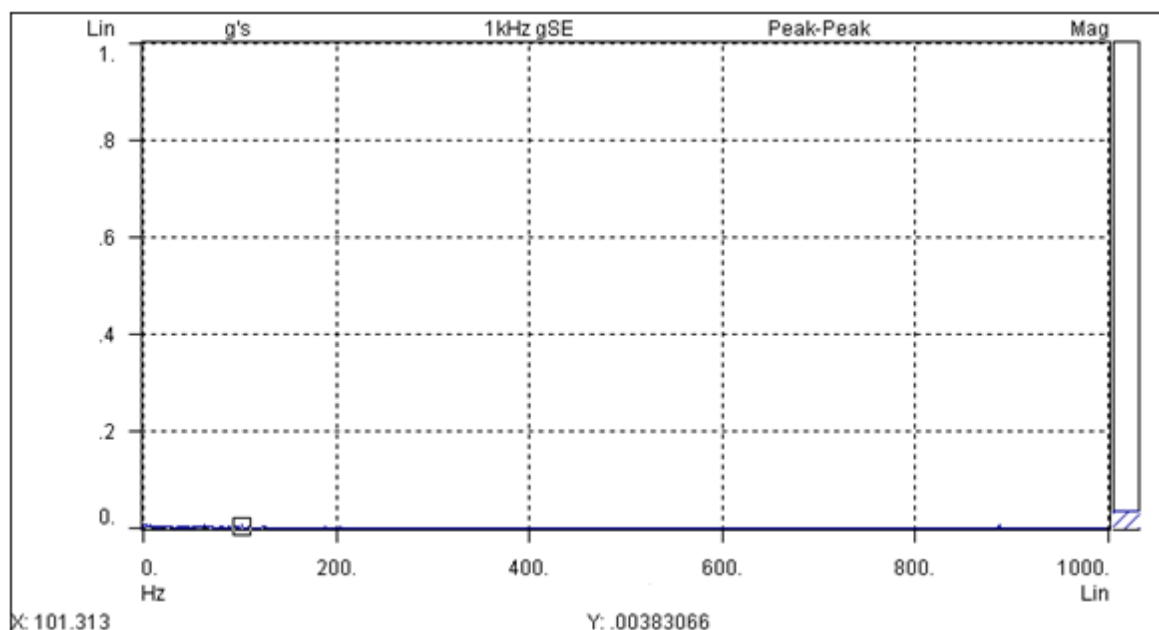
Tato kapitola bude obsahovat příklady poškození ložisek, která byla zachycena při mém měření vibrací v praxi. Budou zde rozebrána frekvenční spektra, jejichž analýzou dojde k detekci a specifikaci poškození ložisek.

Na obrázku 31 je vyobrazené spektrum poškození ložiska z předlohy ventilátoru. Jedná se o zobrazení spektra zrychlení vibrací metodou Spike Energy. Na spektru je označena dominantní špička na frekvenci 101 Hz s harmonickými násobky. Jednalo se o poškození vnějšího kroužku ložiska.



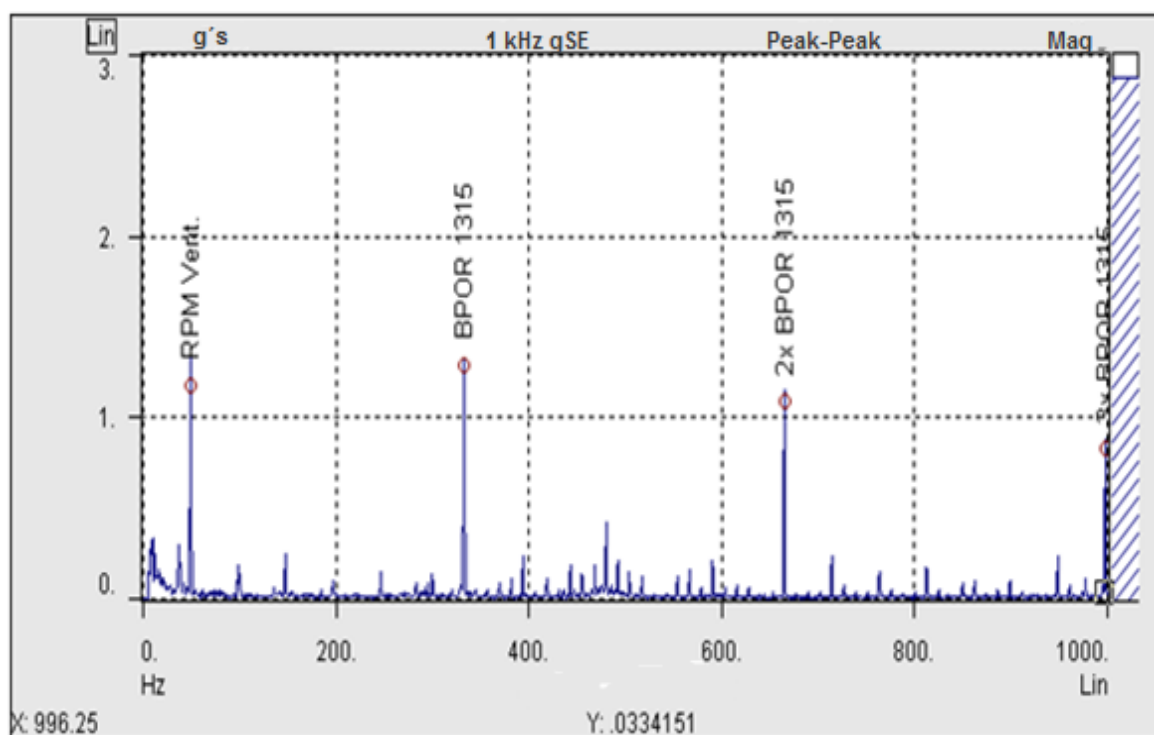
Obr. 31 Spektrum zrychlení vibrací (zobrazené ve spektru gSE 1000) s detekovaným poškozením ložiska

Pro porovnání je na obrázku 32 vyobrazeno spektrum zrychlení vibrací po výměně poškozeného ložiska za nové. Je patrné, že ve spektru při použití metody SE poklesl celkový šum hladiny zrychlení vibrací a hlavně zmizela špička na 101 Hz s harmonickými násobky.



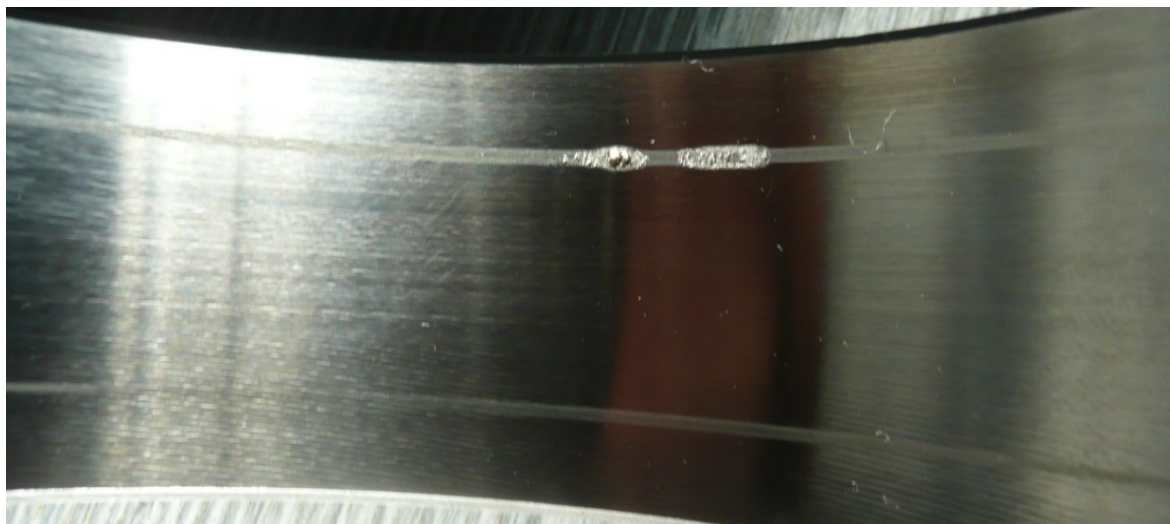
Obr. 32 Spektrum zrychlení vibrací (zobrazené ve spektru gSE 1000) po výměně ložiska

Další příklad je podpořen vizuální ukázkou poškozeného ložiska po jeho výměně. Jedná se o spektrum zrychlení vibrací Spike Energy, na kterém je označena otáčková frekvence daného zařízení. Dále je označena defektní složka na frekvenci vnějšího kroužku ložiska s jeho harmonickými násobky.



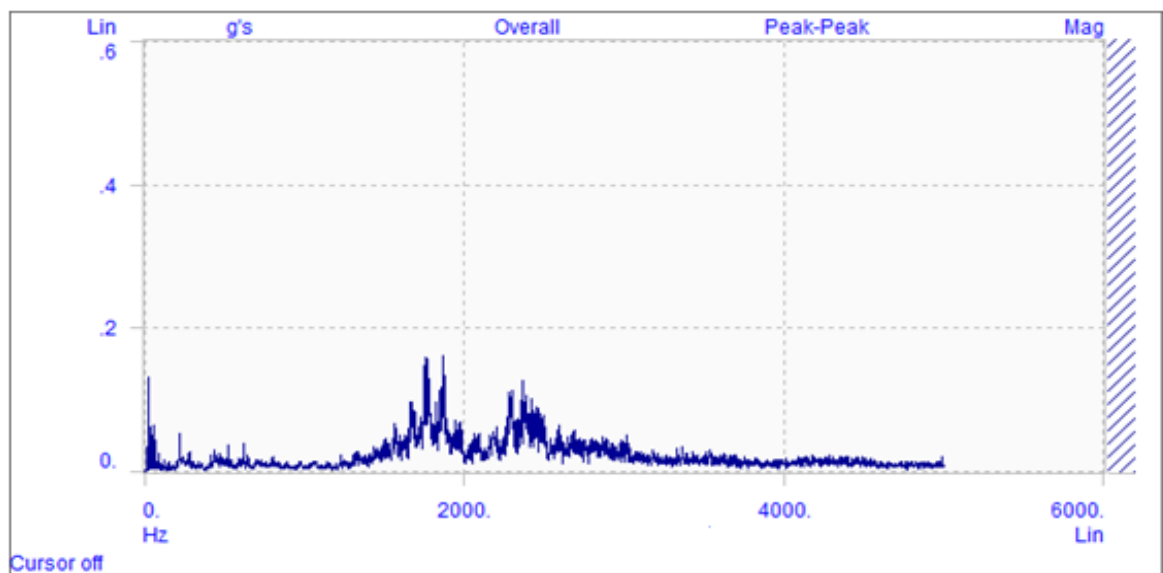
Obr. 33 Spektrum zrychlení vibrací (zobrazené ve spektru gSE 1000) s detekcí poškození na vnějším kroužku ložiska

Po demontáži ložiska bylo provedeno podrobné prozkoumání, kterým bylo zjištěno, že na vnějším kroužku se nachází defekt. Byl detekován bodový pitting a vyjeté drážky od válečků ložiska na vnějším kroužku v místech největšího zatížení.



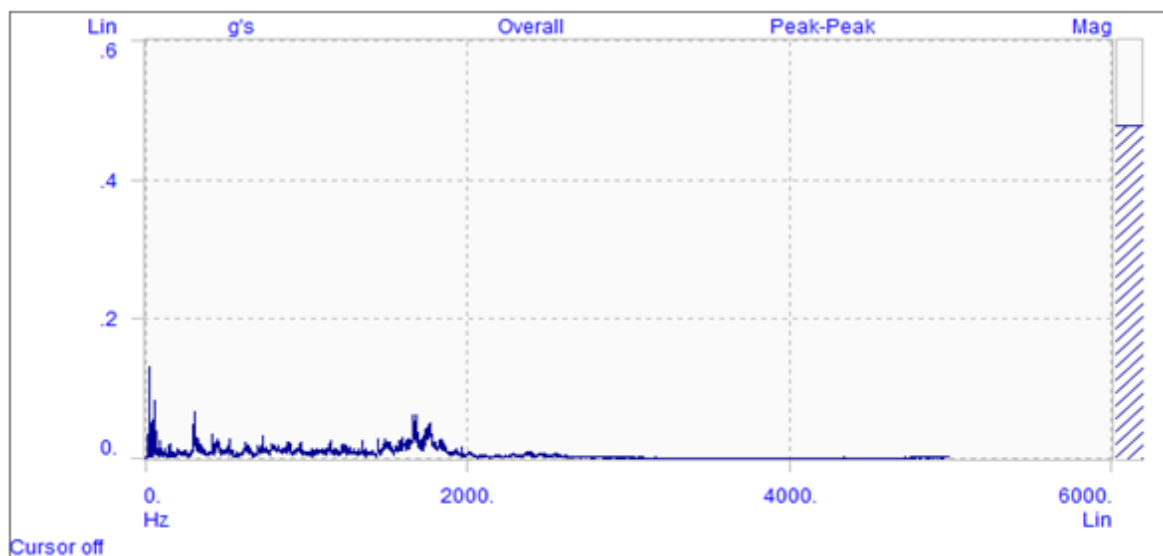
Obr. 34 Poškozené ložisko z výrazným pittingem na vnějším kroužku

Další případ se týká nedostatečného mazání ložiska. Při měření bylo detekováno nedostatečné promazání ložiska, které se projevovalo vysokým akustickým hlukem. Nejvíce se projevuje málo namazané ložisko ve spektrech zrychlení vibrací. Ve spektru zrychlení vibrací jde vidět zvýšený vysokofrekvenční šum v oblasti 2 - 3 kHz.



Obr. 35 Spektrum zrychlení vibrací (zobrazené ve spektru ACC) nedostatečně namazaného ložiska

Po domazání ložiska v průběhu provozu zařízení okamžitě utichl zvýšený akustický hluk. Došlo celkově ke snížení hodnot zrychlení vibrací a ve spektrech se již neprojevoval zvýšený vysokofrekvenční šum. Na tomto příkladu je dobře vidět, jak snadno a rychle lze odstranit nedostatečné namazání ložiska.



Obr. 36 Spektrum zrychlení vibrací (zobrazené ve spektru ACC) po domazání ložiska

Pro znázornění je uvedeno ložisko, které bylo poškozené v důsledku nedostatečného mazání. Jednalo se o ložisko, které bylo mazáno pomocí tekutého maziva. Ložiskový domek dobře netěsnil a mazivo se dostalo z domku ven. Z důvodu absence mazacího média došlo k nárůstu teploty a následnému zadření ložiska.



Obr. 37 Ložisko poškozené v důsledku nedostatečného mazání

5.2 Praktické příklady nevývahy

Tato kapitola obsahuje reálné příklady z praxe, kdy nastala nevývaha oběžného kola. S nevývahou se dá v praxi setkat poměrně často. Jedná se o jednu z nezákladnější poruchu obecně rotačních zařízení.

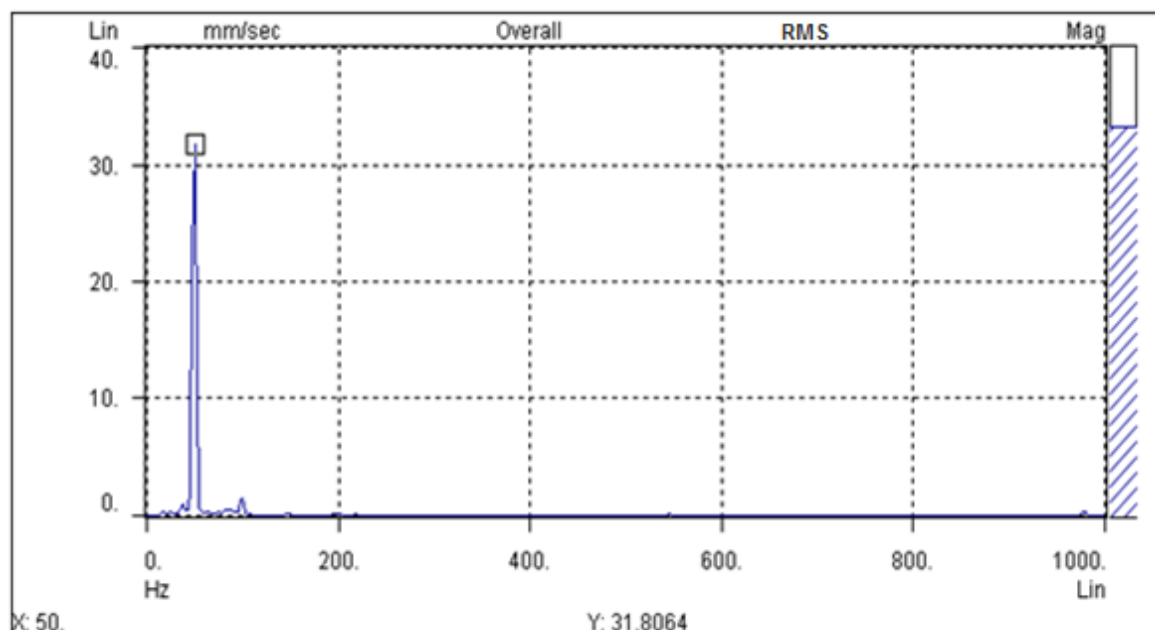
V prvním příkladu je ukázán ventilátor, který měl oběžné kolo přímo na hřídeli elektromotoru. Výkon elektromotoru je 25 kW a jeho otáčky jsou 3000 ot/min. Přístup k ventilátoru je dostatečně velký, není problém tedy vyvažovat ventilátor na místě.

Prvním měřením byly detekovány vysoké celkové hodnoty rychlosti vibrací. Hodnoty dosahovaly až 33 mm/s. Při použití normy pro ventilátory ČSN 12 2011, skupiny II, třídy 4, se tyto hodnoty ventilátoru řadí do pásma D. Rozdělení pásem hodnot rychlostí vibrací dle normy ČSN 12 2011 je uvedeno v tabulce 3. Norma dělí mezní hodnoty do čtyř pásem A - D. Do pásma A se řadí nové stroje. Stroje jejichž vibrační hladina spadá do pásma B, mohou být provozovány neomezeně dlouhou dobu. Stroje s hladinou vibrací v pásmu C nejsou vhodné pro dlouhodobý provoz a pásmo D je považováno za nebezpečné a může způsobit havárii stroje.

Tabulka 3 Mezní hodnoty pro normu ČSN 12 2011

Mezní hodnoty rychlosti vibrací RMS			
Norma ČSN 12 2011	A/B	B/C	C/D
Skupina II, Třída 4	4,5	7,1	11,2
Pásmo A	Pásmo vibrací nových strojů, nebo strojů po GO		
Pásmo B	Pásmo vibrací pro neomezenou dobu provozu stroje		
Pásmo C	Pásmo vibrací považováno za neuspokojivé pro dlouhodobý provoz		
Pásmo D	Pásmo vibrací považováno za nebezpečné a může způsobit havárii stroje		

Ve spektru rychlostí vibrací je patrná dominantní amplituda na frekvenci otáčení oběžného kola 50 Hz, která je obrazem nevývahy. Hodnoty vibrací spadají dle normy ČSN 12 2011 do pásma D.



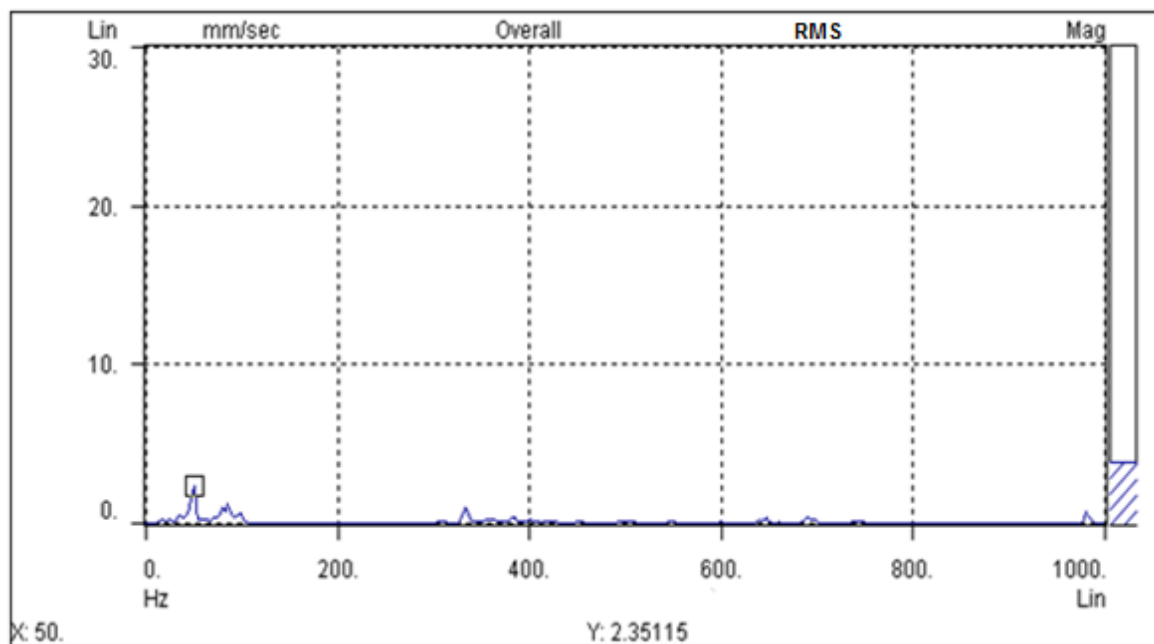
Obr. 38 Spektrum rychlostí vibrací znázorňující nevývahu oběžného kola ventilátoru

Následovalo vyvážení oběžného kola ventilátoru. Bylo použito vyvažovací závaží, které bylo přišroubováno na oběžné kolo do vyvrtané díry. Na obrázku 39 je pro představu ukázáno, jak vypadá připevněné korekční závaží na ventilátorovém kole.



Obr. 39 Znázorněné připevněné závaží na oběžném kole ventilátoru

Po přidání korekčního závaží přestal ventilátor výrazně vibrovat. Z naměřených spekter lze krásně pozorovat, jak poklesla dominantní špička na otáčkové frekvenci 50 Hz ventilátoru. Celkové rychlosti vibrací po vyvážení ventilátorového kola spadaly do pásma A. Stroj byl tedy úspěšně vyvážen a mohl být bez problému opět provozován.



Obr. 40 Spektrum rychlostí vibrací ventilátoru po úspěšném vyvážení

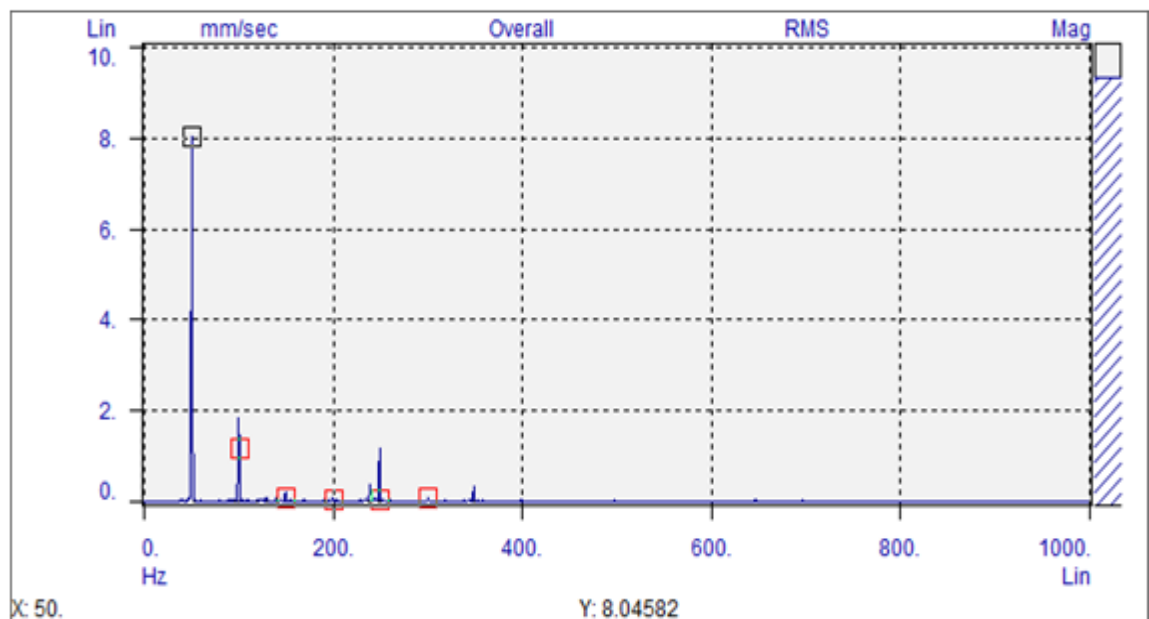
5.3 Nesouosost

Příklad nesouososti z praxe se týkal zařízení na přečerpávání vody. Po výměně ložisek na elektromotoru byl elektromotor vrácen na své místo. Po umístění motoru na původní místo bylo provedeno vibrodiagnostické měření vibrací s následnou analýzou spekter. Analýza spekter odhalila nesouosost mezi elektromotorem a čerpadlem. Muselo se tedy provést ustavení elektromotoru vůči čerpadlu.



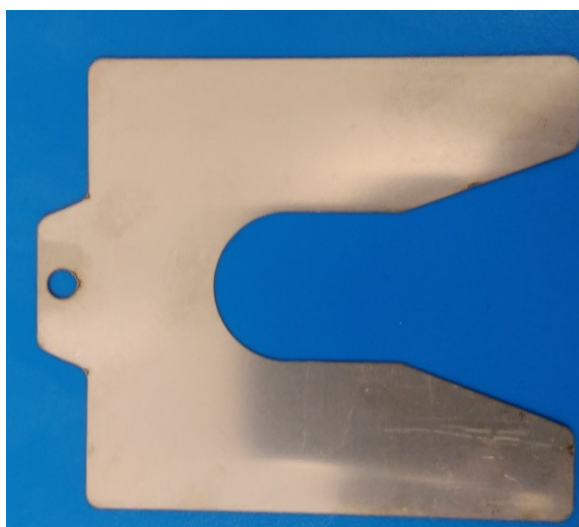
Obr. 41 Ustavovaný elektromotor s čerpadlem

Ve spektru je patrná dominantní amplituda na otáčkové frekvenci 50 Hz s harmonickými násobky. Dle spektra může být na vině i nevývaha, ale dle konstrukce zařízení se zde tato možnost vylučuje. Vyšší hladina vibrací a přítomnost vyšších harmonických složek ve spektru rychlostí vibrací poukazuje na nesouosost spojky.



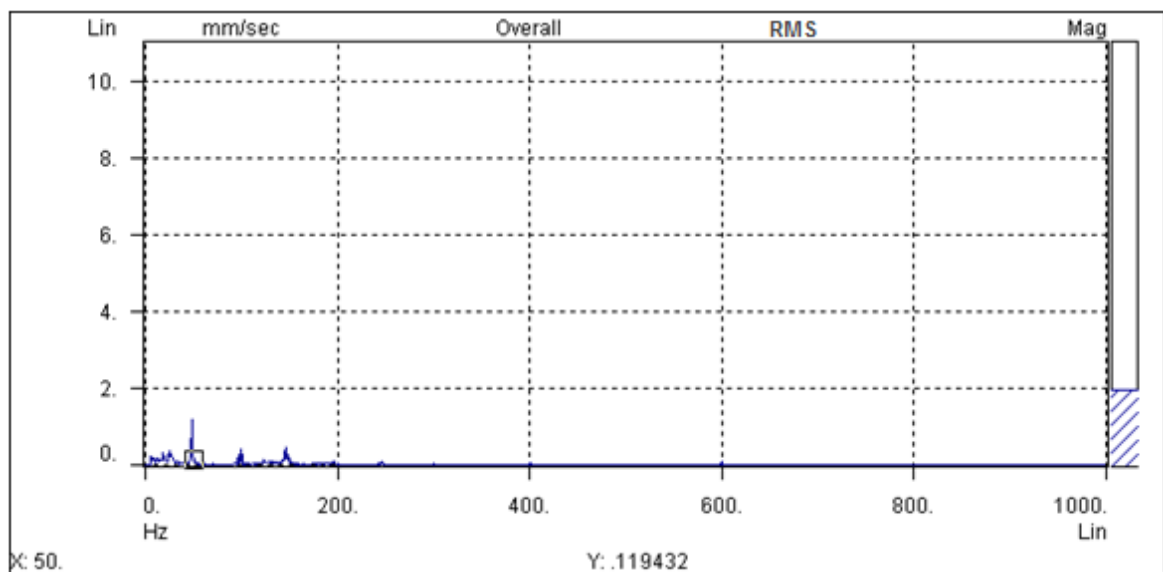
Obr. 42 Spektrum rychlostí vibrací poukazující na nesouosost mezi elektromotorem a čerpadlem

Pro odstranění nesouososti byl použit přístroj Easy Laser. Pod patky elektromotoru se přidaly ustavovací podložky dle korekčních výpočtů z přístroje. Ustavovací podložky jsou vyrobeny z nerezových materiálů, aby postupem času nedocházelo k degradaci materiálů, což by mohlo zapříčinit opětovný vznik nesouososti.



Obr. 43 Ustavovací podložka pod patky elektromotoru

Po ustavení elektromotoru dle pokynů přístroje následovalo opětovné přeměření zařízení. Z výsledku měření je patrné, že ustavení mělo pozitivní vliv a došlo ke snížení celkových hodnot rychlosti vibrací. Ze spekter je patrný výrazný pokles amplitudy na otáčkové frekvenci 50 Hz a vymizení vyšších harmonických složek.



Obr. 44 Spektrum rychlostí vibrací po ustavení zařízení

6 Závěr

První část diplomové práce se věnuje návrhu a sestavením modelu pro simulaci různých poruch, které lze detekovat pomocí vibrodiagnostických metod. Další část se zabývá poruchami, které lze na modelu simulovat. V poslední části diplomové práce je ukázáno několik praktickým příkladů se kterými se dá v běžné diagnostické praxi setkat.

Z praktických důvodů jsem navrhl a vyřešil konstrukční řešení rozšíření stávajícího modelu, přičemž byla splněna všechna kritéria daná v kapitole 2. Vytvořil jsem 3D návrh daného řešení, který jsem následně realizoval v ucelený celek. Po sestavení modelu jsem odzkoušel všechny nové komponenty, zdali plní svoji funkci.

Další část diplomové práce byla zaměřena na popsání jednotlivých dílců pro simulování daných poruch, které jdou simulovat na sestaveném modelu. Byly zde popsány poruchy jako nevyvaha, nesouosost, napnutí řemene, nesouosost řemenic a měření na převodovce.

Poslední část diplomové práce je věnována praktickým příkladům z praxe. Jsou zde ukázány příklady poškození ložisek, nevyvahy a nesouososti. Ke všem příkladům jsou znázorněna a popsána frekvenční spektra, která charakterizují danou poruchu zařízení.

Přínos této diplomové práce spočívá v tom, že model v budoucnu poslouží k výuce studentů. Budou tak mít možnost se seznámit a vyzkoušet vibrodiagnostické metody a zkoumat dané projevy poruch. Dále mají možnost si vyzkoušet, jak dané poruchy odstranit.

Jednou z velkých výhod modelu je, že byl postaven na variabilní platformě. Díky tomu ho lze kdykoliv přestavět. Naskytuje se tak možnost k modelu připojit další konstrukční prvky, které by rozšířily model o další funkce, jako je například přidání konstrukčního prvku, který by simuloval proměnné zatížení. Další možností je, že na model bude nainstalováno online zařízení pro monitorování vibrací. Studenti tak budou mít možnost se naučit nastavit online systém pro určitou aplikaci a srovnat výhody a nevýhody oproti offline měření vibrací.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat VŠB-TUO, Katedře výrobních strojů a konstruování z Fakulty strojní, že mi umožnila realizovat tvorbu modelu k diplomové práci. Dále bych chtěl poděkovat konkrétně mému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Janu Blatovi, Ph.D. za rady a odborné konzultace a panu Ing. Lukáši Heisigovi, Ph.D. taktéž za odborné rady a připomínky k diplomové práci.

7 Použitá literatura:

- [1] JENČÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. ČVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6
- [2] HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. *Technická diagnostika a spolehlivost II. Vibrodiagnostika*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004, 173 s. ISBN 80-248-0650-9.
- [3] TŮMA, Jiří. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha: Sdělovací technika, 1997, 174 s. ISBN 80-901-9361-7.
- [4] HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. *Technická diagnostika a spolehlivost IV. provoz a údržba strojů*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008, 127 s. ISBN 978-80-248-1690-6.
- [5] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: studijní opora*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012, 1 DVD-ROM. ISBN 978-80-248-2755-1.
- [6] BLATA, Jan a Janusz JURASZEK. *Metody technické diagnostiky: teorie a praxe = Metody diagnostyki technicznej : teorie a praktyka*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013, 130, 135 s. ISBN 978-80-248-2997-5.
- [7] KREIDL, Marcel. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. Praha: BEN, 2006, 406 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0158-6.
- [8] KREIDL, M. a kol.: *Diagnostické systémy*. ČVUT v Praze, Praha 2001, 352 s., ISBN 80-01-02349-4
- [9] KOPÁČEK, Jaroslav. *Technická diagnostika hydraulických mechanismů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990, 159 s. ISBN 80-03-00308-3.
- [10] ČSN 20 0065. *Metody měření a hodnocení mechanického kmitání-Mezní hodnoty kmitání*. Praha: Český normalizační institut, červen 1992. 16 s.
- [11] ČSN ISO 10816-3. *Vibrace - Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech*. Praha: ČNI, 2009.

[12] ČSN ISO 20 2011. *Ventilátory, Maximálně přípustné hodnoty mechanického kmitání*. Praha: ČNI, 1989.

[13] ČSN ISO 690. *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 32 s.

[14] ČSN 01 6910. *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

[15] Tachometr: T2B - Digitální laserový tachometr. [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.damitech.cz/produkty/>

[16] TYMA: Ustavení souososti. [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://zbozi.arkov.cz/i/173684-tkba-10-univerzalni-pristroj-pro-ustaveni-remenic-a-retezovych-kol-skf.html>

[17] SKF: Zařízení pro ustavování souososti. [online]. [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/maintenanceproducts/alignment-tools/belt-alignment-tools/info.html>

[18] Firemní podklady firmy Heistech

8 Seznam obrázků

Obr. 1 Existující model na měření vibrací	11
Obr. 2 Náčrt navrhnutého řešení modelu	14
Obr. 3 Zobrazení 3D původního modelu	15
Obr. 4 Zobrazení 3D modelu s vylepšením	15
Obr. 5 Podstava nové části pod převodovku	16
Obr. 6 Převodovka z Jawy Special	17
Obr. 7 Vnitřní led osvětlení převodovky	17
Obr. 8 Nahlížecí otvor do převodovky	18
Obr. 9 Zobrazení vnitřních částí převodovky s popisem	18
Obr. 10 Řemenový převod SPZ	19
Obr. 11 Posuvná deska pod převodovku	19
Obr. 12 Nastavitelné rameno otáčkové sondy	20
Obr. 13 Finální podoba modelu	20
Obr. 14 Měřicí zařízení Enpac 2500	22
Obr. 15 Akcelerometr použitý při měření	23
Obr. 16 Optická sonda z řady TB2 [15]	23
Obr. 17 Kufr s Easy laserem a příslušenství	24
Obr. 18 Znázorněné nevývahy ve spektru, a) statická nevývaha, b) momentová nevývaha, c) dynamická nevývaha [2]	25
Obr. 19 Vyobrazení postupu vyvažování	27
Obr. 20 Znázorněné nesouososti ve spektru, a) úhlová nesouosost, b) paralelní nesouosost [2]	28
Obr. 21 Vyobrazení postupu vyvažování	30
Obr. 22 Pohled shora na převodovku, H - horizontální směr, V - vertikální směr, A - axiální směr	30
Obr. 23 Základní poruchy ozubených kol [2]	31
Obr. 24 Detail ozubeného kola s poškozenými zuby	31
Obr. 25 TKBA 10 při praktické aplikaci [16]	32
Obr. 26 A) Vertikální úhlová nesouosost, B) Horizontální úhlová nesouosost, C) Rovnoběžná nesouosost, D) Správné ustavení řemenic [17]	32
Obr. 27 SKF PHL FM 10/400 při praktické aplikaci [16]	33
Obr. 28 Pomocí gola klíče dochází k regulaci napnutí řemene	33
Obr. 29 Naznačené regulační šrouby pro regulaci souososti řemenic	34
Obr. 30 Spektra mechanického uvolnění a geometrický model pro měření provozních tvarů kmitů [2]	35

Obr. 31 Spektrum zrychlení vibrací (zobrazené ve spektru gSE 1000) s detekovaným poškozením ložiska.....	36
Obr. 32 Spektrum zrychlení vibrací (zobrazené ve spektru gSE 1000) po výměně ložiska	37
Obr. 33 Spektrum zrychlení vibrací (zobrazené ve spektru gSE 1000) s detekcí poškození na vnějším kroužku ložiska	37
Obr. 34 Poškozené ložisko z výrazným pittingem na vnějším kroužku	38
Obr. 35 Spektrum zrychlení vibrací (zobrazené ve spektru ACC) nedostatečně namazaného ložiska	38
Obr. 36 Spektrum zrychlení vibrací (zobrazené ve spektru ACC) po domazání ložiska	39
Obr. 37 Ložisko poškozené v důsledku nedostatečného mazání	39
Obr. 38 Spektrum rychlostí vibrací znázorňující nevývahu oběžného kola ventilátoru	41
Obr. 39 Znázorněné připevněné závaží na oběžném kole ventilátoru	41
Obr. 40 Spektrum rychlostí vibrací ventilátoru po úspěšném vyvážení	42
Obr. 41 Ustavovaný elektromotor s čerpadlem	42
Obr. 42 Spektrum rychlostí vibrací poukazující na nesouosost elektromotoru mezi čerpadlem.....	43
Obr. 43 Ustavovací podložka pod patky elektromotoru	43
Obr. 44 Spektrum rychlostí vibrací po ustavení zařízení.....	44

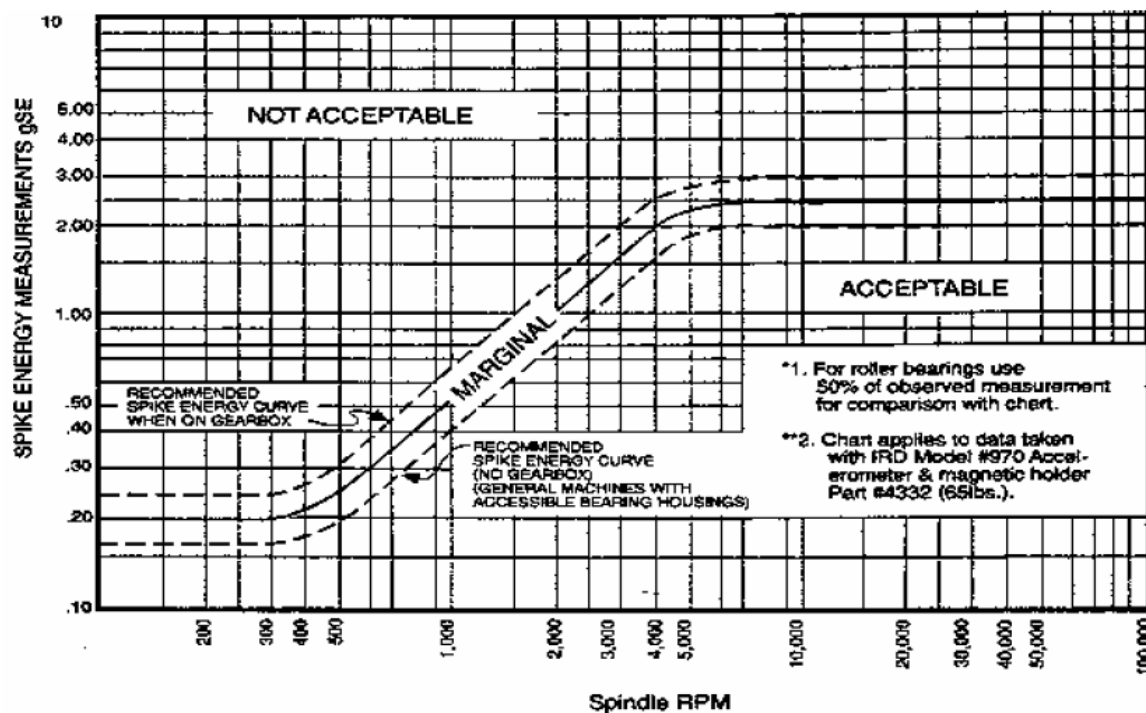
9 Seznam tabulek

Tabulka 1 Základní informace o sestaveném modelu	21
Tabulka 2 Souhrnné informace o ceně jednotlivých dílů	21
Tabulka 3 Mezní hodnoty pro normu ČSN 12 2011	40

10 Seznam příloh

Příloha č. 1 – Limity stavu valivého ložiska pro metody SPIKE ENERGY

- Příloha č. 1 Limity stavu valivého ložiska pro metody SPIKE ENERGY



Grafické znázornění limitů zrychlení [18]